



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ DESTILAČNÍHO PROCESU V LIHOVARU

PROCESS CONTROL OF A DISTILLERY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Sejkora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Veselý, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Sejkora

ID: 195429

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Řízení destilačního procesu v lihovaru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši v oblasti procesu fermentace a destilace.
 2. Navrhněte strukturu řídicího systému pro danou technologii.
 3. Navrhněte algoritmus řízení a vizualizaci destilačního procesu.
 4. Implementujte navržené algoritmy řízení procesu.
- Cílem práce je návrh řídicího systému pro stávající malou destilační kolonu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Astrom, K. J., Wittenmark, B.: Computer-Controlled Systems: Theory and Design, Prentice Hall, 1996. 555s. ISBN 978-0133148992

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 17.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Libor Veselý, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o návrhu řídicího systému pro destilační kolonu. Pojednává o problematice výroby destilátů a seznamuje čtenáře s potřebnými znalostmi, které je nutné znát pro pochopení účelu práce. V praktické části práce je představena konkrétní destilační kolona, prostředky pro její řízení a způsob realizace řídicího systému, dále pak vizualizace řídicího systému a způsob ovládání. Součástí práce je zhodnocení výsledků a přínosu práce.

Klíčová slova

Destilace, destilační kolona, ethanol, deflegmátor, chladič, regulace, vizualizace

Abstract

This master's thesis deals with the design of a control system for a distillation column. It deals with the issue of distillate production and acquaints the reader with the necessary knowledge that is necessary to understand the purpose of the work. The practical part of the work presents a specific distillation column, the means for its control and the method of implementation of the control system, then the visualization of the control system and the method of control. Part of the work is the evaluation of the results and benefits of the work.

Keywords

Distillation, distillation column, ethanol, dephlegmator, condenser, regulation, visualization

Bibliografická citace

SEJKORA, Martin. *Řízení destilačního procesu v lihovaru*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134742>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Libor Veselý.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Bc. Martin Sejkora
VUT ID studenta:	195429
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/2021
Téma závěrečné práce:	Řízení destilačního procesu v lihovaru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 17. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Liboru Veselému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, cenné rady a vstřícný přístup při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji panu Davidu Procházkovi za možnost tvorby diplomové práce na jeho zařízení a za finanční zajištění celého projektu.

V Brně dne: 17. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
1. TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 VÝROBA DESTILÁTŮ.....	12
1.1.1 Suroviny pro výrobu.....	12
1.1.2 Alkoholy	13
1.2 FERMENTACE	14
1.2.1 Produkty kvašení.....	14
1.2.2 Příprava kvasu.....	15
1.3 DESTILACE	15
1.3.1 Druhy destilací.....	16
1.3.2 Destilace směsi ethanol-voda	17
1.4 DESTILAČNÍ ZAŘÍZENÍ	19
1.4.1 Destilační kotel	20
1.4.2 Rektifikační zařízení a deflegmátor	21
1.4.3 Chladič.....	22
1.4.4 Epruveta.....	23
1.5 MĚŘENÍ OBSAHU ETHANOLU	24
1.5.1 Hustoměr.....	24
1.5.2 Teplotní závislost	26
1.5.3 Refraktometr	26
1.6 VÝROBA GINU	27
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
2.1 POPIS TECHNOLOGIE.....	29
2.2 HARDWAROVÉ VYBAVENÍ.....	30
2.2.1 PLC	31
2.2.2 Snímače.....	32
2.2.3 Akční členy.....	34
2.3 REGULACE.....	35
2.3.1 Identifikace soustav.....	38
2.3.2 Návrh regulátorů	43
2.3.3 Výsledky regulace	43
2.4 MĚŘENÍ OBSAHU ALKOHOLU	47
2.4.1 Korekce teplotní závislosti.....	50
2.5 PROGRAM PLC.....	53
2.5.1 Struktura programu	53
2.5.2 Destilační profily	55
2.5.3 Běh programu	57
2.5.4 Alarmy.....	58
2.6 VIZUALIZACE	58
2.6.1 OPC UA	59

2.6.2	<i>mapp View</i>	59
2.6.3	<i>Návrh obrazovky HMI</i>	60
2.6.4	<i>Zabezpečení</i>	63
ZÁVĚR		65
LITERATURA		66
SEZNAM PŘÍLOH		68

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Destilační aparatura: 1 – zdroj tepla, 2 – baňka, 3 – destilační nástavec, 4 – teploměr, 5 – chladič, 6 – alonž, 7 – předloha [11]	16
Obrázek 1.2: Jednoduchá rektifikační kolona [9]	17
Obrázek 1.3: Graf závislosti lihovitosti a teploty par na koncentraci ethanolu ve směsi	18
Obrázek 1.4: Destilační kotel s přímým (vlevo) a nepřímým (vpravo) ohřevem [1]	20
Obrázek 1.5: Typické tvary klobouků [1]	21
Obrázek 1.6: Deflegmační talíř (1), kloboučková patra (2) [2]	22
Obrázek 1.7: Typy chladičů: a) spirálový, b) trubkový, c) talířový [1]	23
Obrázek 1.8: Lihová epruveta [2]	23
Obrázek 1.9: Lihoměr	24
Obrázek 1.10: Správné pozorování stupnice hustoměru [5]	25
Obrázek 1.11: Graf závislosti hustoty destilátu na obsahu ethanolu	25
Obrázek 1.12: Refraktometr a jeho stupnice [7]	27
Obrázek 2.1: Schéma destilační kolony	30
Obrázek 2.2: Kompletní PLC, včetně zapojení	32
Obrázek 2.3: Umístění teplotního čidla v jímce	33
Obrázek 2.4: Čidlo hladiny vaporizační komory	34
Obrázek 2.5: Připevněný ventil VAG 61.15-1 DN 15 se servopohonem GQD161.9A	35
Obrázek 2.6: Schéma zpětnovazební regulační smyčky	35
Obrázek 2.7: Průběh teploty par nad kotlem	37
Obrázek 2.8: Data pro identifikaci soustavy chladiče	39
Obrázek 2.9: Upravená data pro identifikaci soustavy chladiče	40
Obrázek 2.10: Porovnání výsledku identifikace chladiče s naměřenými daty	40
Obrázek 2.11: Data pro identifikace soustavy deflegmátoru	41
Obrázek 2.12: Upravená data pro identifikaci soustavy deflegmátoru	42
Obrázek 2.13: Porovnání výsledku identifikace deflegmátoru a naměřených dat	42
Obrázek 2.14: Průběh regulace teploty deflegmátoru	44
Obrázek 2.15: Průběh regulace teploty chladiče	45
Obrázek 2.16: Schéma simulace nelinearity a dynamiky ventilu	46
Obrázek 2.17: Výsledek simulace	46
Obrázek 2.18: Provizorní umístění čidla chladiče	47
Obrázek 2.19: Měření lihovitosti v epruvetě	48
Obrázek 2.20: Charakteristika stupnice lihoměru	49
Obrázek 2.21: Graf závislosti korekcí na koncentraci alkoholu	50
Obrázek 2.22: Graf závislosti koeficientů rovnic na koncentraci alkoholu	51
Obrázek 2.23: Graf teplotní korekce měření koncentrace alkoholu	52
Obrázek 2.24: Struktura programu	55
Obrázek 2.25: Obrazovka konfigurace destilačního profilu	56
Obrázek 2.26: Výměna dat mezi HMI a řídicím systémem [14]	59
Obrázek 2.27: Funkce mapp View [15]	60
Obrázek 2.28: Vizualizace – hlavní stránka	61
Obrázek 2.29: Vizualizace – stránka konfigurace	62
Obrázek 2.30: Vizualizace – stránka kalibrace lihoměru	62
Obrázek 2.31: Vizualizace – stránka přihlášení	63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Závislost lihovitosti a teploty par na koncentraci ethanolu ve směsi [2]	18
Tabulka 2: Možnosti výkonů spirál	31
Tabulka 3: Konfigurace PLC	32
Tabulka 4: Závislost koeficientů rovnice na koncentraci alkoholu	51

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá řízením destilačního procesu a automatizací destilační kolony. Cílem práce je návrh řídicího systému stávající destilační kolony, která slouží pro výrobu ginu. Tato destilační kolona je majetkem p. Davida Procházky, který je zároveň technologem a investorem tohoto projektu. Práce tedy spadá do oblasti řízení procesů a procesní automatizace.

Důvodem tvorby této práce a zájmu na vytvoření řídicího systému je především zajištění opakovatelnosti destilačního procesu. Dále samozřejmě možnost stabilně řídit procesy destilace, omezení potřeby obsluhy a tím spojené úspory času, a také možnost sledování dat a jejich výsledného zobrazování pro potřeby úpravy technologického procesu.

Práce byla rozdělena do dvou hlavních částí – teoretické a praktické. V teoretické části bude čtenář seznámen s principy výroby destilátů a s procesy fermentace a destilace. Dále bude popsáno, z jakých částí se destilační kolona skládá a jakou mají tyto části funkci. Zároveň bude představena problematika měření obsahu alkoholu v destilátech. Na závěr části bude přiblížena problematika výroby ginu.

V praktické části bude čtenář nejdříve seznámen s technologickým vybavením, tedy s příslušnou destilační kolonou. Dále bude popsáno dodané hardwarové vybavení, které bude sloužit pro realizaci řídicího systému. Poté bude následovat seznámení s potřebou regulací procesů, postup při realizaci regulací a jejich výsledek. Zároveň se čtenář seznámí s řešením problému měření obsahu alkoholu ve výsledném destilátu. Samozřejmostí je popis ovládacího programu. V neposlední řadě bude popsána tvorba vizualizace a její funkce.

Na závěr následuje shrnutí celé práce, zhodnocení dosažených výsledků, přínos práce pro samotnou výrobu a také pokračování projektu a možnosti dalších úprav.

1. TEORETICKÁ ČÁST

V této části práce bude čtenář seznámen se základními principy problematiky výroby destilátů, samotné destilace a využívaných zařízení. Většina uvedených poznatků se bude vztahovat k ovocnářským lihovarům (tedy k výrobě výrobu destilátů z ovocných či jiných kvasů). Nicméně uvedené principy obecně platí pro výrobu jakýkoliv destilátů. Dalším důvodem je, že odborná literatura je v tomto ohledu relativně strohá a zaměřuje se právě na ovocnářské lihovary, také nazývané jako pěstitelské pálenice. Je důležité, aby čtenář tuto problematiku pochopil a seznámil se ze základními pojmy v tomto oboru, neboť v praktické části práce budou tyto termíny a principy zmiňovány. Jedná se ovšem o problematiku, která je v jejích základech obecně známá, a tudíž nepředstavuje její pochopení problém.

1.1 Výroba destilátů

Znalost alkoholických nápojů jakožto i jejich výroba je známá velmi dlouho, dokonce sahá až do starověku. První podoba „výroby“ byla velice primitivní, kdy se nechaly sladké plody samovolně zkvasit, a po zkvašení se pila samotná šťáva. Tento proces se během staletí měnil, kdy se pro výrobu koncentrovanějších alkoholických nápojů začala využívat destilace. Není přesně známo, kdy se tyto destilační přístroje začaly využívat, nicméně prošly řadou změn, než se přetvořily v přístroje, jaké známe dnes. V souladu s touto evolucí byly získávány nové poznatky a byly vylepšovány destilační aparatury tak, aby vedly k vyšším výtěžkům a dosažení co nejvyšší kvality destilátu. Dnes již tento obor lihovarnictví představuje jak nezanedbatelnou část průmyslu, tak i bezpočet malých pálenic, kde se zaměřují na malovýrobu z vlastních kvasů či výrobu velmi kvalitních destilátů vyráběných v malých dávkách, které jsou dnes velmi oblíbené. [1][2]

1.1.1 Suroviny pro výrobu

Obecně lze k výrobě destilátů použít jakoukoliv surovinu obsahující sacharidy. To může být ovoce, kořeny některých rostlin nebo obilí. Pro výrobu potravinářského lihu v průmyslovém měřítku slouží melasa (zbytek po vylisování cukrové řepy nebo třtiny), brambory, pšenice, žito nebo kukuřice. Výtěžek alkoholu pak závisí na obsahu cukru v dané surovině. Ovšem pro výrobu pálenek (destilát z ovocnářského lihovaru) je neméně důležitý obsah aromatických látek, které pak výslednému produktu dávají charakteristickou chuť a aroma. U ovoce je důležitá jeho zralost, neboť pak je dosaženo vysokého obsahu cukru a dobrého aroma. Vhodnými druhy ovoce pro výrobu pálenek jsou peckové ovoce (švestky, slívy, třešně, višně meruňky a broskve), jádrové ovoce (jablka a hrušky), bobulové ovoce (angrešt, rybíz nebo borůvky) nebo i další suroviny, jako jsou výtlačky (tedy zbytky po vylisování ovoce), bezinky, šípky, jeřabiny, jalovčinky, pýr, hořec nebo kvasnicové kaly. Různé druhy surovin pak mají pak různý

obsah cukrů, kyselin a jiných látek. Jejich výtěžnost, kvalita, chuť a aroma se tedy výrazně liší, jakož i postup přípravy a destilace. [1][2]

Veškeré ovoce obsahuje vysoký podíl vody, který se může pohybovat mezi 70-90 %. Dále obsahuje proměnlivé procento cukrů (sacharidů). Sacharidy samotné můžeme dělit na monosacharidy (např. glukóza a fruktóza) a polysacharidy (sacharóza, maltóza, laktóza, celulóza nebo škrob). Různé vlastnosti jednotlivých sacharidů různě ovlivňují alkoholové kvašení, proto jejich vzájemný poměr v ovoci ovlivňuje výslednou podobu kvasu, a tudíž i výsledného destilátu. Ovoce obsahuje také různé kyseliny, které přímo ovlivňují štěpení polysacharidů. Dále jsou v ovoci obsaženy bílkoviny, pektinové látky, minerální látky, aromatické látky a vitaminy. Pecky ovoce rovněž obsahují tuky. [2]

Významnou součástí vstupních surovin jsou enzymy. Enzymy jsou katalyticky účinkující bílkoviny. Ovlivňují rychlost reakcí, ale při reakci se nespotřebovávají (tedy katalyzují). Některé reakce by bez enzymů vůbec neprobíhaly, nebo by byly za normálních podmínek nepatrné. Enzymy jsou produkovány buňkami, která je buď vyměšuje, a poté působí enzym vně buňky, nebo enzym účinkuje uvnitř buněk. Účinek enzymů závisí na prostředí, zejména na teplotě. Optimální je teplota v rozmezí 40-50 °C, ovšem při teplotě nad 75 °C se nevratně ničí. Škodlivě rovněž působí ultrafialové světlo. Při alkoholovém kvašení hrají roly hydrolytické enzymy podmiňující rozklad některých sloučenin, oxidační a redukční enzymy nebo katalyzující enzymy podporující štěpení. [2]

1.1.2 Alkoholy

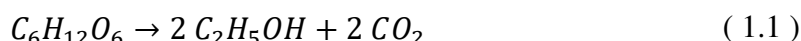
Alkoholy jsou kyslíkaté sloučeniny odvozené od uhlovodíků náhradou vodíku hydroxylovou skupinou OH. Podle počtu této skupiny rozeznáváme jednomocné alkoholy (jedna OH skupina), dvojmocné, trojmocné atd. Jednomocné alkoholy mají obecný vzorec $C_nH_{2n+1}OH$. Nižší a střední alkoholy jsou bezbarvé kapaliny, z nichž se první tři mísí s vodou v každém poměru. Pro nás důležité alkoholy jsou methanol (CH_3OH) a ethanol (C_2H_5OH).

Methanol je v přírodě vzácně volný. Dá se technicky vyrobit suchou destilací dřeva či katalyticky ze zemního plynu. Methanol má bod varu 66 °C a hustotu 796,5 kg/m³ a má příjemnou lihovou vůni. Do destilátů se může dostat z kvasů, zejména z látek bohatých na pektiny. Důležitá je jeho negativní vlastnost na lidský organismus, jedná se o jedovatou látku.

Ethanol se v přírodě vyskytuje často vlivem samovolného kvašení. Převážně se ethanol vyrábí zkvašováním cukrů, lze ho však připravit i synteticky. Ethanol má bod varu 78,3 °C a hustotu 793,6 kg/m³. S vodou se mísí za každého poměru, kdy při mísení nastává objemová kontrakce a objeví se mírné zahřátí. Čistý ethanol je prudký jed, který při vstříknutí do krevního oběhu může způsobit smrt. Kromě destilátů nachází využití i jako rozpouštědlo, k přípravě octa, voňavek, k topení či svícení nebo jako surovina pro syntézu celé řady látek. [2]

1.2 Fermentace

Fermentace neboli kvašení je anaerobní¹ proces štěpení cukrů. Známe různé druhy kvašení, lihové, mléčné, máselné, acetonové atd. Obecně ovšem pojem kvašení (fermentace) představuje přeměnu organických látek pomocí mikroorganismů na jednodušší produkty. V našem případě je důležité právě alkoholové kvašení, což je rozklad cukru na ethanol a oxid uhličitý. Chemicky se jedná o vznik dvou molekul ethanolu a dvou molekul oxidu uhličitého z jedné molekuly hexosy (sacharid s šesti uhlíkovými atomy). [2]



Původcem kvašení jsou tzv. pravé kvasinky. Jedná se o jednobuněčné mikroorganismy ze skupiny hub o velikosti 4-14 μm. Ty se vyskytují téměř všude v přírodě. Vedle těchto pravých kvasinek ale s dalšími kvasinkami, plísněmi a bakteriemi, které mohou nepříznivě ovlivnit průběh kvašení a kvalitu kvasu. Různé kmeny kvasinek se liší kvasnou mohutností a dalšími vlastnostmi, které poté ovlivňují kvalitu a dobu kvašení, a také vytvářejí různé aroma. Kvasinky se při teplotách na 20 °C velice rychle rozmnožují. Optimální teplota pro kvašení je ovšem lehce nižší, asi 16-20 °C, jelikož by probíhalo rychle a vytrácely by se aromatické látky. Kvasinky obsahují množství enzymů, které štěpí přítomný cukr (především glukózu a fruktózu). Proces kvašení by měl probíhat bez přístupu vzduchu, neboť všechny nežádoucí organismy jsou při anaerobním prostředí omezeny. Dále vznikající ethanol brání rozvoji různých mikroorganismů. Při koncentraci ethanolu 14-15 % již není prostředí snesitelné ani pro kvasinky, a jejich činnost ustává. [1][3]

1.2.1 Produkty kvašení

Nejdůležitějším produktem alkoholového kvašení je samozřejmě ethanol, lidově pouze alkohol nebo líh. Jeho množství je ovlivněno obsahem cukru v kvašené surovině.

Při kvašení vzniká ve velkém množství oxid uhličitý. Proto je důležité vnitřní prostory pro účely kvašení náležitě větrat. Tvořící se oxid uhličitý způsobuje pohyb kvasu. Zároveň unikající oxid uhličitý vyplní prostor kvasné nádoby a tím vytlačí kyslík.

Dalším produktem kvašení je glycerol. Je to olejovitá kapalina sladké chuti, která je žádoucí například při výrobě vína. Do destilátu se ale vlivem následné destilace nedostává.

Za normálních podmínek obsahuje kvas stopy acetaldehydu. Má výrazný pálivý charakter ve vůni i chuti, ale vzhledem v teplotě varu kolem 20 °C lze v případě potřeby oddělit přiměřenou destilací.

Kromě ethanolu vznikají i další vyšší alkoholy, které jsou označovány jako přiboudlina. Ta vzniká jako vedlejší štěpný produkt kvasinek. Přiboudlina dodává

¹ Anaerobní proces je takový, při kterém není přítomen vzdušný kyslík

destilátu palčivou příchutí a způsobuje toxické následky po požití. Vzhledem v bodu varu mezi 115-120 °C lze obsah přiboudliny v destilátu omezit včasným ukončením destilace. V malém množství ovšem spolu s ostatními aromatickými látkami dodává destilátu typickou příchutí a aroma.

Ovoce v kvasu obsahuje určité množství pektinových látek, které uvolňují methanol a kyseliny. Tvrdé ovoce obsahuje více pektinových látek než měkké, a tudíž uvolňuje větší množství methanolu. Tvorbě methanolu se nedá zabránit. Jelikož je teplota varu methanolu 64,7 °C, lze z výsledného destilátu částečně odstranit odebráním prvního vytékajícího destilátu. Ovšem i přes tuto skutečnost se v malém množství objevuje ve všech frakcích.

Dále vznikají další látky jako kyseliny mléčná a octová, vonné estery a další aromatické látky, které společně utváří výslednou chuť a aroma destilátu. V závislosti na použité surovině může vznikat také kyanovodík. Ten vzniká především při použití peckového ovoce a dodává destilátu charakteristické peckové aroma. [1][3]

1.2.2 Příprava kvasu

První důležitou zásadou při tvorbě ovocného kvasu je použití pouze zdravého, čistého a vyzrálého ovoce. Nahnilé či plesnivé ovoce prodělává nevhodné biochemické změny, které kvas znehodnocují. Působením nežádoucích mikroorganismů vzniká větší množství kyseliny octové, obsah vyšších kyselin a přiboudliny. V příliš kyselém prostředí je rozmnožování kvasinek přibrzděno nebo i zcela zastaveno. [2]

Aby se spustilo alkoholové kvašení, musí se buněčné stěny ovoce narušit, čímž se uvolní cukr. To zajistíme rozmělněním surovin. V průběhu rozmělnění se uvolní ovocná šťáva a unikající cukr začne kvasit. Tato rozemletá břečka se pak nazývá rmut. Míra rozmělnění závisí na typu destilačního kotle, který bude sloužit pro následnou destilaci. Pro kotle s přímým ohřevem má být rmut hrubší, naopak pro kotle s vodní lázní může být rmut jemný (více o typech kotlů v kap. 1.4.1). Rozmělnění ovoce se provádí pomocí vhodných mlýnků či drtičů. Záleží na druhu suroviny, peckové ovoce budeme rozmělnovat jinak než ovoce jádrové. Významnou pozornost je třeba věnovat právě peckám. Jejich rozdrčením může totiž destilát získat silnější aroma po hořkých mandlích. Je ale třeba rozdrčení provést pouze v určité míře, jinak je aroma až příliš silné a destilát znehodnotí. Připravený rmut je třeba co nejrychleji přivést ke kvašení, aby se nezačaly rozmnožovat nežádoucí mikroorganismy. Toho se docílí dostatečně řídkým rmutem a přiměřenou počáteční teplotou. [2][3]

1.3 Destilace

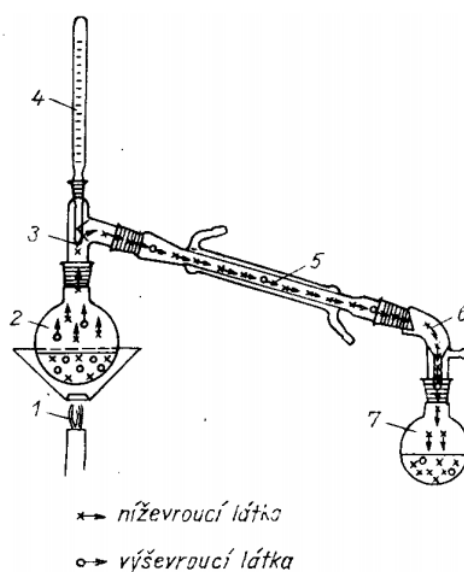
Destilace je separační metoda, kdy od sebe oddělujeme dvě nebo více kapalných látek na základě rozdílné teploty varu (rozdílné těkavosti). Cílem destilace je zvýšit koncentraci jedné složky vzhledem k ostatním složkám. Při zahřívání dvousložkové směsi přechází do plynného skupenství nejprve směs bohatší na těkavější složku. V průmyslu můžeme

znát destilaci například při zpracování ropy, avšak nás bude zajímat její využití v potravinářství při výrobě destilátů. [9]

1.3.1 Druhy destilací

Podle způsobu provedení můžeme destilace rozdělit na několik druhů: prostá destilace, frakční destilace, rektifikace, destilace za sníženého tlaku, destilace s vodní parou, azeotropní destilace a molekulární destilace. Ne všemi se v této práci budeme zabývat. [9]

Prostá destilace se většinou využívá k oddělení dvou látek s podstatným rozdílem bodů varu. Jednoduché destilační zařízení pro prostou destilaci sestává z destilační baňky, destilačního nástavce, chladiče, alonže (nástavce), předlohy a teploměru. Takovéto jednoduché zařízení je znázorněno na následujícím obrázku.

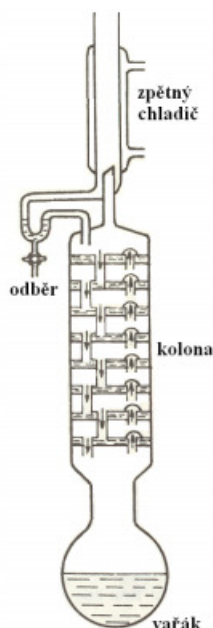


Obrázek 1.1: Destilační aparatura: 1 – zdroj tepla, 2 – baňka, 3 – destilační nástavec, 4 – teploměr, 5 – chladič, 6 – alonž, 7 – předloha [11]

Pokud máme směs látek o blízké teplotě varu, prostá destilace již není dostačující, a musíme přejít k tzv. frakcionaci, kde destilát rozdělujeme na několik frakcí (podílů). Tyto podíly můžeme dále destilovat, a tak více koncentrovat žádanou látku v destilátu. Jednotlivé frakce můžeme postupně vhodně míchat, a tak efektivně vydestilovat požadovanou látku. Stále ovšem zůstává frakční destilace velmi pracná a poskytuje malé výtěžky. [9]

Pokud využijeme frakční destilaci s použitím destilační kolony, hovoříme o rektifikaci. Používá se všude tam, kde prostá destilace není dostačující. Kvalita dělení je pak dána konstrukcí kolony. Kapalná směs se varem mění v páru obohacenou o těkavější složku. Tato pára stoupá vzhůru, následně kondenzuje a stéká zpět dolů. Stoupající páry tak opakovaně přichází do styku s protiproudým kondenzátem, který se stoupajícími parami znovu ohřívá a opět obohacuje páry. Teplota varu směsi tedy v koloně směrem vzhůru klesá. Kondenzát, který se kolonou vrací zpět, se nazývá zpětný

tok neboli reflux. Podíl zpětného toku a odebíraného destilátu se nazývá refluxní poměr a je důležitým faktorem ovlivňující účinnost dělení. [9]



Obrázek 1.2: Jednoduchá rektifikační kolona [9]

Pokud není k dispozici dostatečně vysoká rektifikační kolona, která by stačila dostatečně rektifikovat směs, je na jejím konci možné použít tzv. deflegmátor. Deflegmací rozumíme ochlazení par v destilační aparatuře. Tím je možné zesílit zpětný tok a tím zefektivnit dělení směsi.

1.3.2 Destilace směsi ethanol-voda

Ethanol je neomezeně mísitelný s vodou. Za normálních podmínek má ovšem voda teplotu varu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ethanol $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. V ideálním případě by tedy při zahřátí směsi na teplotu ethanolu znamenalo vypaření ethanolu a voda by zůstala v kotli. V reálném světě na sebe ovšem jednotlivé složky působí a ovlivňují tak chování při destilaci. Je nutné si uvědomit, že kromě ethanolu a vody je ve směsi ještě velké množství dalších látek, které výsledné chování směsi také ovlivňují. To pak může znamenat, že složky směsi mají větší snahu uniknout do plynné fáze než ve stavu čisté kapaliny. Výsledek je takový, že za normálních podmínek od sebe nelze vodu a ethanol zcela oddělit. Důvodem je, že ethanol a voda tvoří azeotropickou² směs o bodu varu $78,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž koncentrace ethanolu je 95,57 % hm. [1][2]

Při zahřívání směsi ethanolu s vodou tedy ethanol téká spolu s vodou a při ochlazení kondenzuje na tekutinu obsahující opět vodu i ethanol. Bod varu směsi je závislý na vzájemném poměru a jeho rozmezí je $78,3\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezi obsahem ethanolu v parách

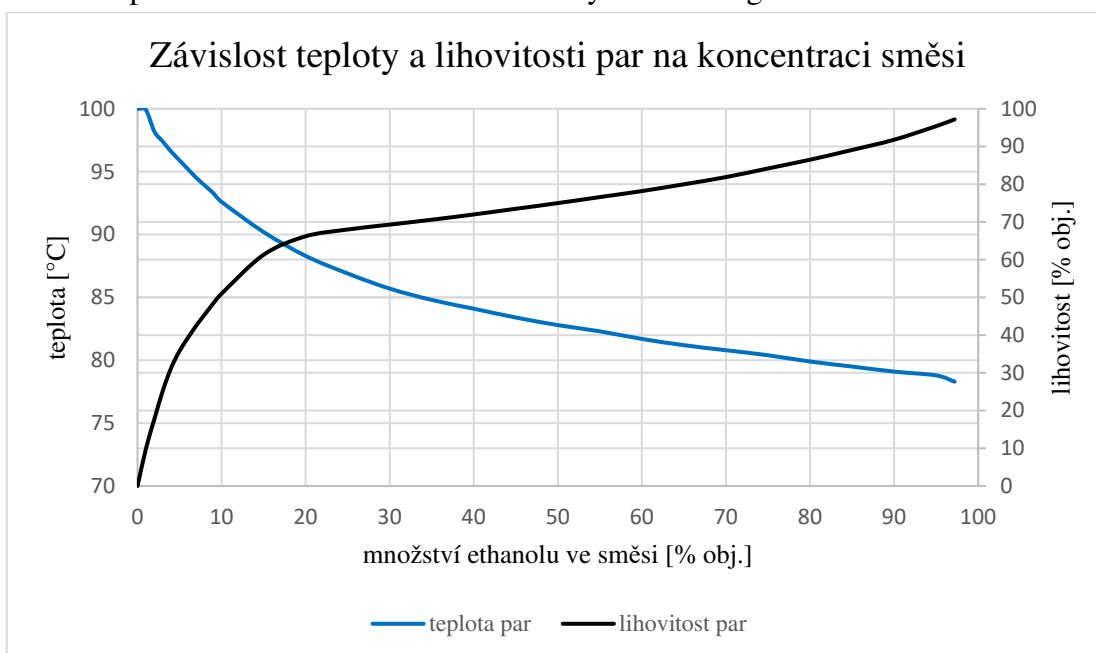
² Azeotropická směs je taková směs, která nelze rozdělit pomocí destilace, neboť je složením plynné a kapalné fáze stejné.

a body varu směsí o různé koncentraci existuje vzájemná závislost, kterou vyjadřuje tabulka č. 1. [2]

Tabulka 1: Závislost lihovitosti a teploty par na koncentraci ethanolu ve směsi [2]

Obsah ethanolu ve směsi (% obj.)	Teplota par (°C)	Lihovitost unikajících par (% obj.)	Obsah ethanolu ve směsi (% obj.)	Teplota par (°C)	Lihovitost unikajících par (% obj.)
0	100	0	35	84,8	70,6
1	99,9	9,9	40	84,1	72
2	98,2	17,7	45	83,4	73,5
3	97,4	25,2	50	82,8	75
4	96,6	31,3	55	82,3	76,6
5	95,9	35,8	60	81,7	78,2
6	95,2	39,3	65	81,2	80
7	94,5	42,6	70	80,8	81,9
8	93,9	45,5	75	80,4	84,2
9	93,3	48,4	80	79,9	86,5
10	92,6	51	85	79,5	89,1
15	90,2	61,3	90	79,1	91,8
20	88,3	66,2	95	78,8	95,4
25	86,9	68	97,2	78,3	97,2
30	85,7	69,3			

Pro lepší názornost můžeme data z tabulky zobrazit v grafu:



Obrázek 1.3: Graf závislosti lihovitosti a teploty par na koncentraci ethanolu ve směsi

Je tedy zřejmé, že při destilaci ovocného kvasu prostou destilací nemůžeme docílit koncentrovaného výstupního destilátu. Proto je nutné buď provést dvojistou destilaci, nebo použít rektifikační kolonu.

Důležitý je způsob odebírání destilátu. Destilát dělíme na tři frakce: Úkap, jádro (také prokap) a dokap. Vždy je nutné tyto tři frakce jímát odděleně. Na správném rozhodnutí o dělení frakcí závisí celá výsledná podoba destilátu.

Úkap je první zachycení destilátu, obsahuje velmi těkavé látky (aldehydy, estery octové kyseliny a methanol). Tato frakce je na vůni i chuti velice štiplavá a nepříjemná. Kdy již úkap skončil poznáme pouze ochutnáním a experimentováním.

Druhá frakce – jádro – je vlastní finální destilát. Zde by měly být obsaženy všechny žádoucí látky a destilát by měl být příjemné vůně i chuti. Jímání jádra bychom měli ukončit asi při 45-50 %, ovšem záleží na typu destilátu a chuti.

Pokud s destilací pokračujeme i po ukončení jímání jádra, hovoříme o dokapu. Lihovitost je již nízká a jsou zde cítit hořké esence a další nežádoucí látky. Dokap jímáme, dokud lihovitost neklesne pod 4-6 %. [1][3]

1.4 Destilační zařízení

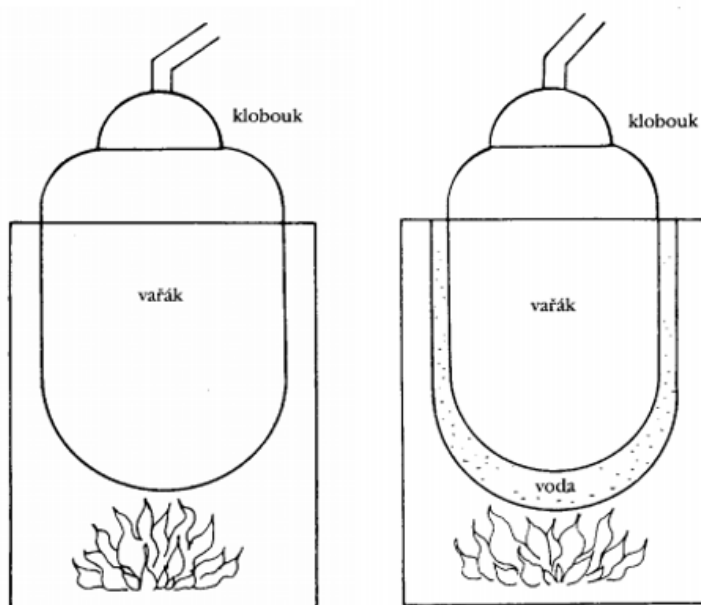
Destilačnímu zařízení je nutné věnovat zvláště velkou pozornost, neboť i z dobrých surovin se vlivem nekvalitních zařízení může stát produkt nevalné chuti. Naproti tomu sebelepší destilační zařízení nemůže vylepšit kvalitu vstupních surovin, tudíž je pro kvalitní destilát nutno disponovat jak kvalitními surovinami (kvas či macerát lihu), tak i kvalitním destilačním zařízením. Na sestavení destilační kolony je velmi závislý také alkoholový výtěžek celého destilačního procesu. [2]

Jednoduché destilační zařízení se skládá z těchto podstatných částí: destilační kotel (neboli vařák), klobouk, přestupník a chladič. Dalšími prvky kolony můžou být rektifikační (kloboučková) patra a deflegmátor, jež slouží k zesílení koncentrace ethanolu, a také katalyzátor. Než si probereme jednotlivé části, je vhodné se zmínit o vhodných konstrukčních materiálech, které jsou vhodné pro destilační přístroje. Nejdůležitějším materiálem je měď. Je to velmi osvědčený materiál, který je hojně využíván především pro příznivé ovlivňování kvality destilátu. Celkově lze definovat pravidlo, že všechny části destilační kolony, které přichází do styku s unikajícími parami, by měly být zhotoveny z mědi, nebo z kovu, který nemá na páry škodlivý vliv. V různých dobách bylo experimentováno s různými materiály (litina, kujné železo či různé slitiny) jež se neosvědčily, neboť se vlivem ethanolových par naleptávají a rychle se opotřebují. Například působení kyselin na uhlík obsažený v železe vzniká uhlovodík, který zhoršuje kvalitu destilátu. Stejně tak může vznikat sirovodík, který je částečně rozpustný, a tak se může dostat do destilátu kde způsobuje nepříjemný zápach. To je podstatné zejména pro pěstitelské pálenice, neboť tyto kyseliny se vyskytují zejména v ovocném kvasu z peckového ovoce. Nepříjemné účinky způsobené korozí můžeme odstranit použitím korozivzdorné (nerezové) oceli. Ta sice odolá nepříjemným účinkům ethanolových par,

nicméně postrádá specifické katalytické účinky mědi. Ovšem rovněž se využívá vzhledem k nižší ceně materiálu. Lze tudíž použít kompromis obou materiálů, kde cesty par jsou tvořeny z mědi, která na sebe váže nežádoucí látky, a ostatní části jsou tvořeny nerezovou ocelí, která vyloučením koroze zabraňuje zhoršení přenosu tepla (způsobené právě vznikem koroze), a tudíž je možné zachovat efektivitu topení a chlazení. [1][2]

1.4.1 Destilační kotel

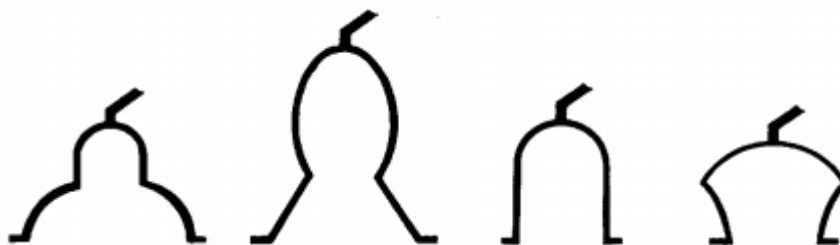
Destilační kotel neboli vařák slouží k ohřátí vstupního materiálu, aby se mohly odpařit těkavé látky. Pro efektivní zahřívání, a tudíž hospodárnou spotřebu energie k ohřátí jsou pro výrobu vhodné materiály s dobrou tepelnou vodivostí (což měď i korozivzdorná ocel jsou). Ohřívání kotle může zajišťovat topení pevným palivem (zejména dřevem), plynový hořák nebo elektrický ohřev. Rozlišujeme dva typy kotlů – kotel s jednoduchou stěnou a kotel s dvojitým pláštěm. U kotle jednoduchou stěnou se jedná o přímý ohřev, kdy mezi zdrojem tepla a obsahem kotle je pouze stěna kotle a materiál se přímo zahřívá. Zde sice dochází k přímému přenosu tepla, ale materiál uvnitř kotle se může snadno připálit, a to může negativně ovlivnit výsledek destilace. Proto je pro tento typ kotle nutná opatrnost a pozornost obsluhy. U kotle s dvojitým pláštěm se tyto nevýhody eliminují. Kotel má dvojitou stěnu, kde prostor mezi stěnami je vyplněn vodní lázní. Zdroj tepla tedy nejprve ohřívá vodu, která posléze ohřeje materiál v kotli. To eliminuje nebezpečí připálení materiálu. Abychom byli schopni efektivně odpařovat těkavé látky, musí být vodní lázeň ve zcela uzavřeném prostoru, abychom dosáhli dostatečného tlaku, a tudíž i teploty vody přesahující 100 °C. Proto je nutné kotel osadit pojišťovacím ventilem, který zabrání přesáhnutí maximálního předepsaného tlaku kotle (například v případě poruchy zařízení). [1]



Obrázek 1.4: Destilační kotel s přímým (vlevo) a nepřímým (vpravo) ohřevem [1]

Dalším důležitou záležitostí je tvar kotle. Aby se zabránilo připalování, mělo by dno kotle mít tvar polokoule, jelikož tento tvar lépe přispívá k vedení tepla a zároveň zlepšuje vlastní promíchávání. Úplnou ochranu před připálením ale zajistí pouze míchací zařízení, které rovněž zajišťuje homogenitu směsi po celou dobu pálení.[3]

Nad destilačním kotlem se nachází tzv. klobouk (též helma nebo přilba). Je důležité, aby byl nad kotlem dostatečně velký prostor sloužící jako sběrný prostor pro vytvořenou páru. Tento prostor se nazývá parní dóm. Klobouk funguje jako předchladič. Jelikož má relativně velký povrch, páry na jeho povrchu částečně kondenzují. Nutná je dobrá tepelná vodivost, tudíž je vhodným materiálem měď. Na povrchu nejdříve kondenzují látky s vyšším bodem varu, v našem případě voda, která se poté vrací zpět do kotle. Dále postupují páry s nižším bodem varu, tedy páry obsahující ethanol. Klobouk dále ústí do přestupní trubky (tzv. přestupníku), která spojuje kotel s chladičem.[1]



Obrázek 1.5: Typické tvary klobouků [1]

1.4.2 Rektifikační zařízení a deflegmátor

Nad kotel (resp. nad klobouk umístěný nad kotlem) lze namontovat zařízení na zesilování ethanolových par (tím rozumíme zvětšování podílu ethanolu v parách). To v podstatě nahrazuje vícenásobnou destilaci. Toto zařízení se skládá z rektifikačních a deflegmačních článků. Funkce rektifikačních článků (také označovány jako kloboučková dna či kloboučková patra) spočívá v zachycení směsi par na stěnách, kde zkondenzují nejprve vodní páry. Kondenzát postupně po patrech steče zpět do kotle a je znovu převařen. Dál postupují páry o vyšším podílu ethanolu. Tento proces lze zefektivnit použitím více pater (obvykle tři), poté hovoříme o tzv. rektifikační koloně. Nad rektifikačními články může být umístěn deflegmátor. Ten funguje na stejném principu jako chladič, avšak ethanolové páry ochlazuje pouze částečně. Může být konstruován podobně jako rektifikační patra, která jsou chlazena vodou (pak se jedná o talířový deflegmátor), nebo jako trubkový deflegmátor (prakticky trubkový chladič, více v kap. 1.4.3). Toto zchlazení způsobí to, že zkondenzují vodní páry, a dál se dostanou pouze páry s vysokým obsahem ethanolu. Hovoříme o deflegmaci, tedy částečném zchlazení par (neboli částečná kondenzace). Deflegmací udržujeme zpětný tok kondenzátu (tzv. reflux). Do deflegmátoru může buď vtékat voda chladná (z vodovodního řádu), nebo se využívá její přehřátí a tím zvýšení citlivosti chlazení. Přehřátí chladící vody může být zajištěno jednak využitím výstupní chladící vody z hlavního chladiče, nebo elektrickým (či jiným) ohřevem.[2]



Obrázek 1.6: Deflegmační talíř (1), kloboučková patra (2) [2]

1.4.3 Chladič

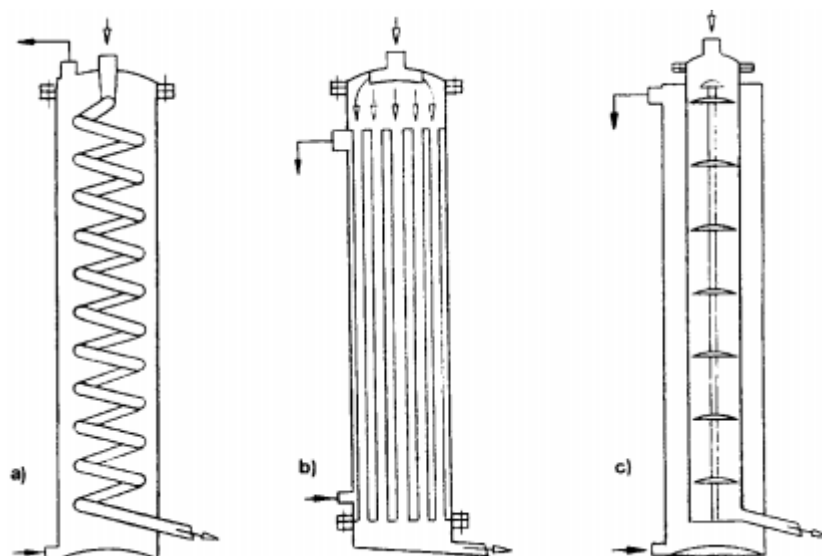
Chladič neboli kondenzátor je zařízení sloužící ke kondenzaci výstupních par. Je nutná taková konstrukce, která zajistí úplnou kondenzaci par a potřebné ochlazení destilátu, jelikož destilát musí vytékat chladný, aby nedošlo k alkoholovým a aromatickým ztrátám.

Můžeme rozlišovat tři typy chladičů. Prvním z nich je spirálový chladič (také nazýván hadový). Jedná se o svinuté měděné trubky, které jsou umístěny ve válcové vodní lázni. Jedná se o jednoduché zařízení, ovšem nevýhodou je špatná možnost čištění, a tudíž i možnost tvorby povrchové koroze měděných částí, která poté může přecházet do destilátu.

Druhým typem chladiče je talířový chladič. Jedná se jednotlivé kovové kotouče ve tvaru talíře, které jsou umístěny nad sebou ve válcové nádobě. Ta je umístěna v chladicí vodě. Výhodou je jednak dobrá účinnost chlazení, a jednak snadné čištění, jelikož lze nádobu s talíři vyjmout.

Třetím typem chladiče je trubkový chladič. Ve válcové nádobě je vertikálně umístěn svazek trubek, kterými prochází výstupní pára. Tento svazek je obtékán chladicí vodou. Nevýhodou je možnost tvorby vodního kamene na stěnách trubky, proto by měl být chladič konstruován tak, aby jej bylo možno otevřít a vyčistit.

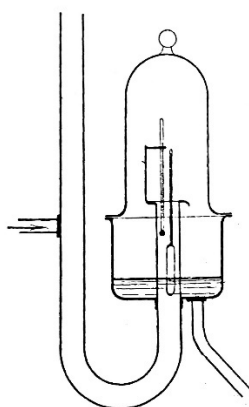
Důležitou konstrukční záležitostí je vstup vody do chladiče. Vstup by měl být vždy umístěn ve spodní části chladiče, aby voda chladičem protékala směrem vzhůru, a chladič opouštěla v horní části (tzv. protiproudé uspořádání). Důvodem je, že by studená voda měla být ve styku s odcházejícím destilátem.[1]



Obrázek 1.7: Typy chladičů: a) spirálový, b) trubkový, c) talířový [1]

1.4.4 Epruveta

Epruveta neboli předloha je zařízení umožňující přímé měření lihu pomocí lihoměru. Je to dostatečně dlouhá trubka, které se musí vejít lihoměr. Z jedné strany do této trubky vstupuje destilát, který vystupuje v horní části, která je umístěna kolmo vzhůru. Destilát stéká do nádobky okolo trubky a odtéká dále. V tomto destilátu pluje lihoměr, na kterém je možno kdykoliv odečíst koncentraci alkoholu. Epruveta je chráněna skleněným víkem či baňkou, která zabraňuje aromatickým a ethanolovým ztrátám. Část epruvety, do níž vstupuje destilát, obsahuje odvětrací trubici, kterou můžou unikat nezkondenzované páry. Výtok destilátu z epruvety do jímací nádoby je třeba provést co nejkratší a s minimálním přístupem vzduchu, aby se zabránilo provzdušňování destilátu. Jímací nádoba by tedy měla být ideálně uzavřená.[1]



Obrázek 1.8: Lihová epruveta [2]

1.5 Měření obsahu ethanolu

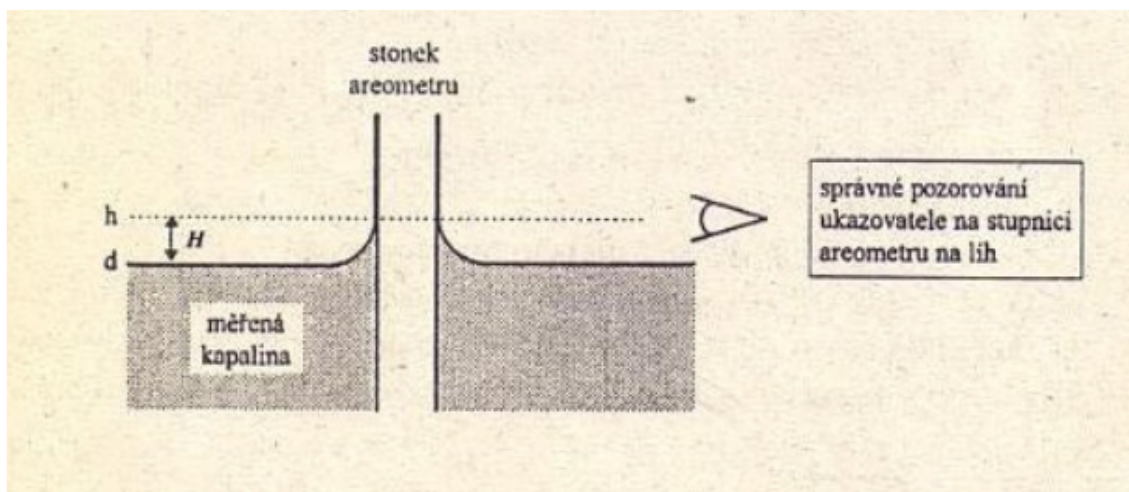
1.5.1 Hustoměr

Tradičně se pro měření obsahu lihu v destilátu používá hustoměr (neboli areometr), pro účely měření obsahu ethanolu též nazývaný lihoměr. Hustoměr je ponorné těleso, které má tvar baňky, ze které vystupuje stopka se stupnicí, které udává hustotu měřené kapaliny.



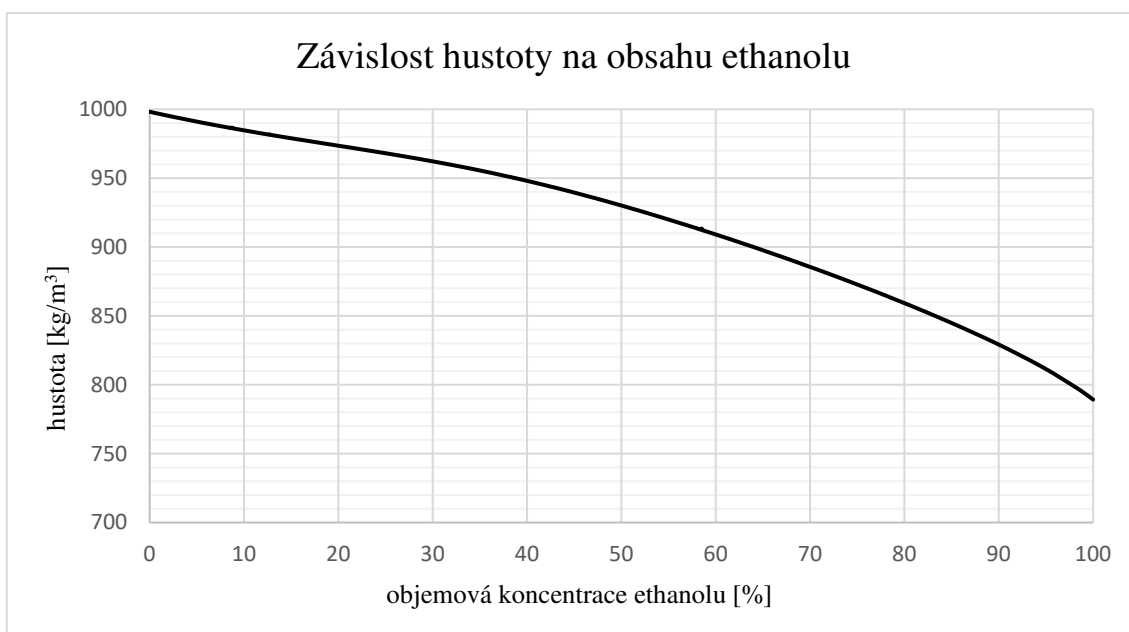
Obrázek 1.9: Lihoměr

Princip hustoměru je založený na rovnováze sil při plavání hustoměru v kapalině. Proti sobě navzájem působí tíhové síly, které působí směrem dolů a jsou závislé na hmotnosti hustoměru, a vztahové síly, které působí směrem nahoru a které závisí na objemu ponořené části hustoměru a na hustotě měřené kapaliny. V rovnovážné poloze je hustoměr zčásti ponořen do kapaliny a hladina kapaliny sahá k určitému místu na stonku hustoměru. Uvnitř stonku je stupnice dělená v jednotkách hustoty (u hustoměrů na líh) nebo v jednotkách objemové koncentrace ethanolu (u lihoměrů). Hodnota hustoty (nebo objemové koncentrace ethanolu) je pak poloha hladiny kapaliny na stupnici, přičemž směr pozorování musí být kolmý. Čtení ze stupnice je dále ovlivněno povrchovým napětím kapaliny, které způsobuje vystoupení kapaliny na styku s povrchem stonku. Ukazatelem správné hodnoty na stupnici je pak horní okraj vystouplé kapaliny (viz Obrázek 1.10). [5]



Obrázek 1.10: Správné pozorování stupnice hustoměru [5]

Měření obsahu ethanolu funguje na principu změny výsledné hustoty roztoku ethanolu a vody. Při 20 °C je hustota ethanolu $789,24 \text{ kg/m}^3$ a hustota vody je $998,2 \text{ kg/m}^3$. Při jejich mísení je pak výsledná hustota závislá na podílu obou látek. Výsledná závislost není lineární a její chování je dáno tabulkami. [4][6]



Obrázek 1.11: Graf závislosti hustoty destilátu na obsahu ethanolu

V grafu na obrázku Obrázek 1.11 můžeme vidět, jak s rostoucí koncentrací alkoholu (tzn. zvětšování podílu ethanolu v roztoku vody a ethanolu) klesá výsledná hustota podle znázorněné křivky. Této křivce pak odpovídá stupnice na lihoměru.

Nutno podotknout, že pro účely měření obsahu ethanolu v destilátech se vždy jedná o objemovou koncentraci ethanolu v roztoku s vodou. Hmotnostní koncentrace ethanolu se liší, jelikož se ethanol s vodou mísí v každém poměru za kontrakce (zmenšení objemu).

S tím souvisí problematika mísení destilátu s vodou (pro definovanou výslednou koncentraci ethanolu). Mísením dvou objemů vody a destilátu nevznikne výsledný produkt o objemu rovnajícimu se součtu obou příměsí, ale jeho objem je menší v závislosti na podílu vody a ethanolu.[8]

1.5.2 Teplotní závislost

Objemová koncentrace ethanolu v destilátu je teplotně závislá. Významná je zejména změna hustoty ethanolu při změně teploty. Hodnota hustoty při 20 °C je již zmiňovaných 789,24 kg/m³, ovšem při 10 °C je 798,1 kg/m³ a při 30 °C je to hodnota 780,7 kg/m³. Jak je vidět, při zvyšující se teplotě hustota ethanolu klesá. S tím je spojená i změna objemu ethanolu, jak vyplývá z následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}, \quad (1.2)$$

kde V je objem, ρ je hustota a m je hmotnost. [4]

U vody je změna objemu a hustoty minimální, ale i přesto se na výsledné teplotní závislosti podepíše. U směsí ethanolu a vody jsou tak nezanedbatelné změny hustoty a objemu, které závisí na teplotě. Z toho plyne jednak složitost měření objemu těchto směsí, jednak i složitost vyjádřit teplotní závislost koncentrace ethanolu. Pro účely přesného vyjádření koncentrace ethanolu v destilátu slouží tzv. Úřední alkoholometrické tabulky. V těchto tabulkách kromě ostatních záležitostí týkající se kontroly a měření destilátů najdeme také tabulky pro výpočet objemové koncentrace ethanolu ze čtení na lihoměru a z teploty roztoku ethanolu a vody. Postup je tedy následující: z lihoměru se odečte hodnota objemové koncentrace a zároveň se změří teplota destilátu. Poté se v tabulkách najde příslušná hodnota koncentrace přečtená z lihoměru a k tomu příslušná teplota. K tomu přísluší výsledná objemová koncentrace ethanolu. [5]

1.5.3 Refraktometr

Refraktometr je zařízení pro měření vlastností kapalin pomocí lomu světla. Jeho principem je zjišťování mezního úhlu lomu. Tento úhel je pak závislý na dané vlastnosti kapaliny, pro jejíž měření je refraktometr určen. Refraktometr se dá využít pro měření nejrůznějších veličin v různých oborech (známé je například jeho využívání v automobilovém průmyslu pro měření teploty zamrzání chladících kapalin motorů a směsí do ostřikovačů). Pro naše účely je samozřejmě důležitá schopnost měření obsahu ethanolu v destilátech. Vyrábí se jak pro měření objemové, tak pro měření hmotnostní koncentrace ethanolu. Rovněž může mít funkci automatické teplotní kompenzace.

Měření se provádí tak, že se na optickou část refraktometru kápne měřená kapalina. Poté se přiklopí krytku hranolu (tím se látka rozprostře po měřicím hranolu) a přiloží se oko k okuláru. Následně se stačí podívat se proti světlu (případně doostřit) a na stupnici se odečte potřebná veličina, v našem případě koncentrace ethanolu. [7]



Obrázek 1.12: Refraktometr a jeho stupnice [7]

1.6 Výroba ginu

Jelikož cílem celé práce bude řízení procesu výroby ginu, je vhodné tomuto nápoji věnovat samostatnou kapitulu.

Základem ginu je neutrální alkohol, který je následně ochucován další destilací za využití různých rostlinných přísad, tedy semen, bobulí, kořínků, ovoce, bylin a kůr, které jsou označovány jako „botanicals“. O těch ale bude zmínka až dále. Neutrální alkohol může být vyrobený z jakéhokoliv zemědělského produktu, ovšem pro výrobu ginu se nejčastěji používá velejemný líh získaný destilací obilovin, který v sobě má minimum látek, které by mohly negativně ovlivňovat jeho chuť. Tento neutrální alkohol se poté naředí vodou a musí se znovu destilovat se zvolenými rostlinnými přísadami, aby se uvolnily jejich esenciální oleje a další chuťové a aromatické látky. Různí výrobci můžou používat různé destilační metody. Jsou dvě hlavní metody výroby ginu.

První metodou je macerování, kdy se jednotlivé přísady mnohdy několik dní louhují v neutrálním alkoholu. Rovněž se přidá voda, která uvolní vonné látky. Poté co je macerace ukončena je výsledná směs predestilována a vzniká výsledný gin plný chuti a vůně použitých ingrediencí. V anglickém jazyce se tato metoda označuje jako „Steep & boil method“.

Druhou metodou je tzv. parní infuze. V tomto případě nejsou přísady přímo v kontaktu s neutrálním alkoholem, ale při destilaci se zavěsí do drátěného koše uvnitř upraveného destilačního přístroje a přicházejí do styku pouze s vylučovanými parami. Poté tyto infuzované páry kondenzují a chuť a aroma přísad se rovněž objeví v destilátu. Tato metoda má v anglickém jazyce název „Vapour infusion method“.

Obě výše zmíněné metody se samozřejmě dají kombinovat podle požadavků výrobce.

Co se týče receptury na výrobu ginu, každý gin má odlišnou recepturu, ovšem všechny druhy ginů jsou ochucovány rostlinnými přísadami – semeny, bobulemi, kořínky, ovoci, bylinami a kůrami – a všechny musí obsahovat jalovec. Kromě jalovce jsou hojně používanými přísadami koriandr a aněžika lékařská. Ovšem pro výrobu ginu je možné použít i více než sto různých bylin, koření a dalších přísad.

Pro mistra palírníka, který dohlíží na celý proces destilace, je důležité porozumět podstatě alkoholu i přísad, vlivu teploty na extrakci látek a složení ginu a správně odhadnout, kdy z destilačního zařízení odebírat ten nejlepší destilát. Proto jsou nároky na zařízení vysoké a automatizace procesu pro zachování opakovatelnosti je zde víc než žádaná. [12][13]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Popis technologie

V této kapitole bude podrobně popsána použitá technologie – destilační kolona, která je uzpůsobena pro výrobu ginu.

Základem destilační kolony je dvouplášťový kotel, sloužící pro ohřev vstupního macerátu. Mezi pláště kotle se nachází vodní lázeň. Hladinu vody můžeme kontrolovat pomocí kontrolního průzoru, kde jsou rovněž vyznačeny meze horní a spodní hladiny. K tomuto prostoru je rovněž připojen pojistný ventil, který se v případě překročení maximálního povoleného tlaku ve dvouplášti otevře a způsobí pokles tlaku. Tento stav by ale za běžných okolností neměl nastat. Ohřev kotle je zajištěn pomocí elektrických topných spirál. Šestice zde nainstalovaných spirál má výkon 3x2 kW a 3x7,5 kW. Pro naplnění kotle surovinami slouží plnicí otvor v horní části kotle. Kotel je dále vybaven elektrickým míchacím zařízením, které je možné zapínat a vypínat dle aktuální potřeby. Obsah kotle je možné vypustit pomocí vypustného ventilu. Nad kotlem se nachází parní dóm zakončený kloboukem. Dále již vystupuje trubka, která přenáší páry do další části kolony.

Další částí kolony jsou rektifikační patra zakončené deflegmátorem. Tyto patra zajišťují zpětný tok kondenzátu, který stéká do nižších pater a posléze do kotle, kde je znovu převařen. Tyto patra lze jednotlivě otvírat a zavírat (resp. jednotlivá patra vyřazovat). Tím může obsluha regulovat deflegmaci na rektifikačních patrech. Samotný deflegmátor se nachází nad těmito patry a je napojen na samostatný chladicí okruh. Vtok chladicí vody do deflegmátoru je ovládán pomocí proporcionálního ventilu. Pro každé rektifikační patro a deflegmátor je připravena jímka pro vložení teplotního snímače. Zároveň je do každého patra a do deflegmátoru zaveden okruh vody sloužící pro čištění.

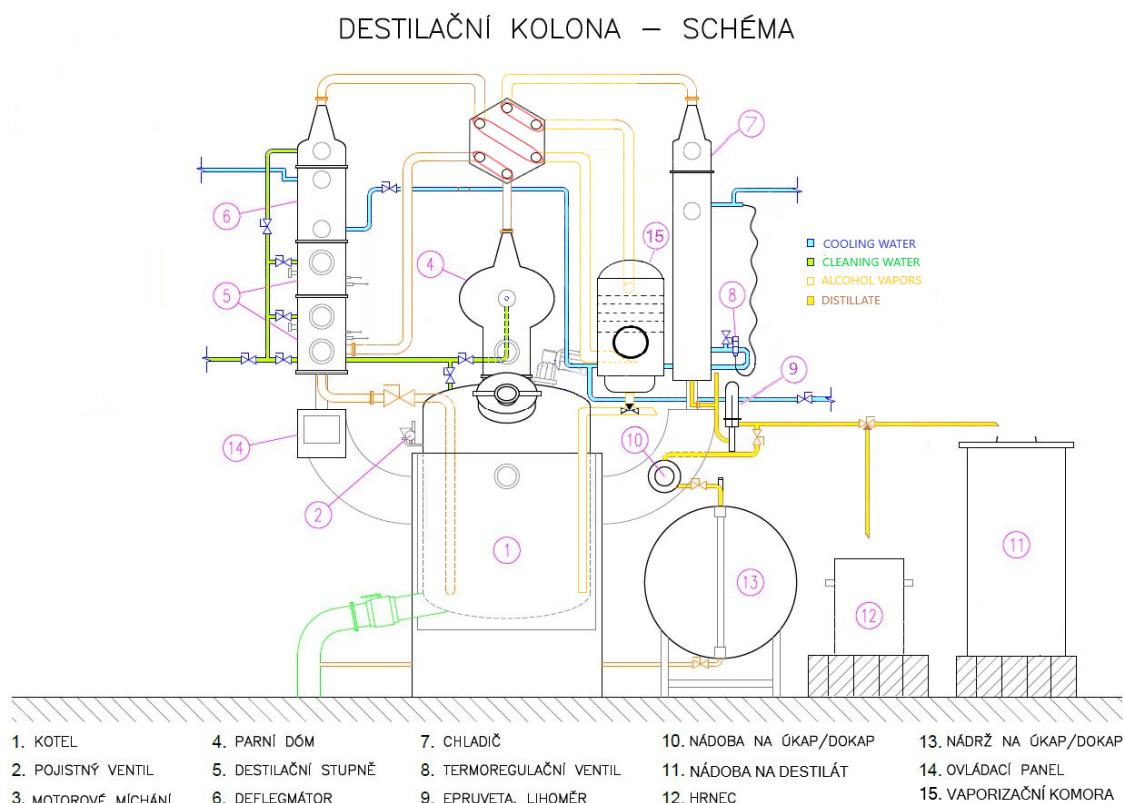
Jedním z prvků destilační kolony je rovněž vaporizační komora. Jedná se o nádobu, do které v její spodní části vstupují páry. Ty procházejí přes soustavu síték a následně pokračují dále do chladiče. Na tyto sítka lze umístit různé ingredience (byliny, plody atd.), přes které pára prochází, a to ovlivňuje výslednou chuť a aroma destilátu. Zároveň zde částečně kondenzuje pára, takže je nutné počítat s plněním komory kondenzátem. Pro indikaci přítomnosti a množství kondenzátu slouží kontrolní průzor. Kondenzát je pomocí ventilů možné vypustit jak zpět do kotle, tak i do připravené nádoby pod touto komorou.

Finální fáze destilace probíhá v chladiči, kde páry kondenzují ve výstupní destilát. Na této destilační koloně se nachází trubkový typ chladiče. Chladič je napojen na samostatný chladicí okruh, kdy chladicí voda vstupuje do chladiče v jeho spodní části, a vystupuje v horní části chladiče. Vtok vody do chladiče je možné ovládat dvěma způsoby: pomocí proporcionálního ventilu nebo pomocí termoregulačního ventilu, který se otevře při překročení určité teploty v chladiči, a zavře při poklesu teploty pod určitou hodnotu. Na výstupu chladiče se nachází jímka pro měření teploty destilátu.

Dále za chladičem se nachází epruveta, kde je umožněno přímé měření koncentrace alkoholu lihoměrem. Nad lihoměrem se nachází skleněná baňka, která brání úniku aromatických látek a zároveň brání přístupu hmyzu k destilátu. Za epruvetou se nachází ventil, který v otevřeném stavu pouští destilát do nádoby na úkap/dokap, za kterou se nachází další ventil, po jehož otevření se destilát vypouští do 600 l nádrže na úkapy a dokapy. Pokud je první jmenovaný ventil uzavřen, proudí destilát k třicestnému ventilu, který přepíná mezi jímáním destilátu do sběrné nádoby na finální destilát a přímém sběru destilátu do připravené nádoby.

Speciálním prvkem destilační kolony je část nad parním dómem, kde je možno definovat průchod par jednotlivými částmi kolony. Pomocí propojovacích trubek se můžou jednotlivé části kolony vyřadit z cesty par. Je tedy možné definovat následující cesty:

- kotel – deflegmátor – vaporizační komora – chladič,
- kotel – deflegmátor – chladič,
- kotel – vaporizační komora – chladič,
- kotel – chladič.



Obrázek 2.1: Schéma destilační kolony

2.2 Hardwarové vybavení

V této kapitole bude popsáno původní vybavení destilační kolony a způsob ovládání, a následně bude popsáno hardwarové vybavení dodané pro řízení destilační kolony.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, ohřev kotle je zajištěn trojicí topných spirál o výkonu 2 kW a další trojicí topných spirál o výkonu 7,5 kW. Maximální výkon je tedy 28,5 kW. Tyto spirály jsou ovládány přes SSR relé, a řízení výkonu tedy není možné provádět spojitě, nýbrž po určitých úrovních výkonu, které docílíme vhodnou kombinací spirál. Možnosti výkonů znázorňuje následující tabulka.

Tabulka 2: Možnosti výkonů spirál

Výkon (kW)	Procentuální vyjádření
0	0 %
2	7 %
4	14 %
6	21 %
7,5	26 %
9,5	33 %
11,5	40 %
13,5	47 %
15	53 %
17	60 %
19	67 %
21	74 %
22,5	79 %
24,5	86 %
26,5	93 %
28,5	100 %

Další SSR relé jsou využívány ke spínání motoru míchadla, čerpadla pro čištění kolony a pro spínání osvětlení. Celý systém ovládání je ovladatelný ručně pomocí přepínačů, ale zároveň je připravený pro vzdálené ovládání nadřazeným systémem, kdy pomocí přepínače přepneme z ručního na vzdálené ovládání, a cívky ovládacích SSR relé se zpřístupní zvenčí.

Systém chlazení při ručním ovládání je realizován pomocí termoregulačního ventilu, který se při přesažení definované teploty výstupní chladicí vody hlavního chladiče otevře a tím zajistí průtok chladicí vody. Ta dále z chladiče vystupuje a pokračuje již přehřátá do deflegmátoru. Tento stávající systém bylo pro účely nového řízení předělat, a to tak, že byly zajištěny dva nezávislé okruhy chladicí vody (pro chladič a deflegmátor), jejichž průtok bude ovládán proporcionálními ventily.

2.2.1 PLC

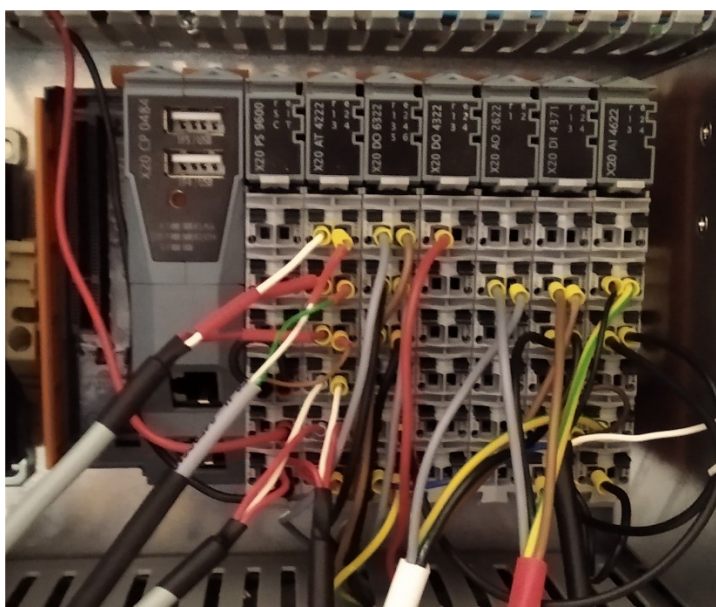
Pro ovládání celého systému bude využit programovatelný logický automat – PLC. Je nutné, aby byly pomocí PLC realizovány všechny požadavky investora (automatické

řízení, ruční ovládání, příslušná vizualizace pro obsluhu, zabezpečení přístupu, log dat atd.), jelikož nad tímto automatem již nebude žádný nadřazený systém.

Po dohodě s vedoucím práce bylo pro řízení vybráno PLC od výrobce B&R Automation, především pro modulární systém, kdy je možné jednoduše konfigurovat počet a typ vstupů a výstupů přidáním příslušných karet, a zároveň pro znalost a předchozí zkušenost s tvorbou projektů v příslušném vývojovém prostředí Automation Studio. Jednotlivé vybrané komponenty PLC zobrazuje následující tabulka.

Tabulka 3: Konfigurace PLC

Označení karty/modulu	Typ a vlastnosti
X20CP0484	Řídící modul (CPU), procesor ARM Cortex-A9 667 MHz, POWERLINK, Ethernet, 2x USB, 256 MB SDRAM, 2 GB Flash paměť
X20PS9600	Napájecí modul
X20AT4222	Modul měření teploty, 4x vstup pro Pt100 nebo Pt1000, třívodičové zapojení
X20DO6322	6x digitální výstup, 24 V, 0,5 A,
X20DO4322	4x digitální výstup, 24 V, 0,5 A,
X20DI4371	4x digitální vstup, 24 V
X20AO2622	2x analogový výstup, ± 10 V nebo 0-20 mA (4-20 mA)
X20AI4622	4x analogový vstup, ± 10 V nebo 0-20 mA (4-20 mA)



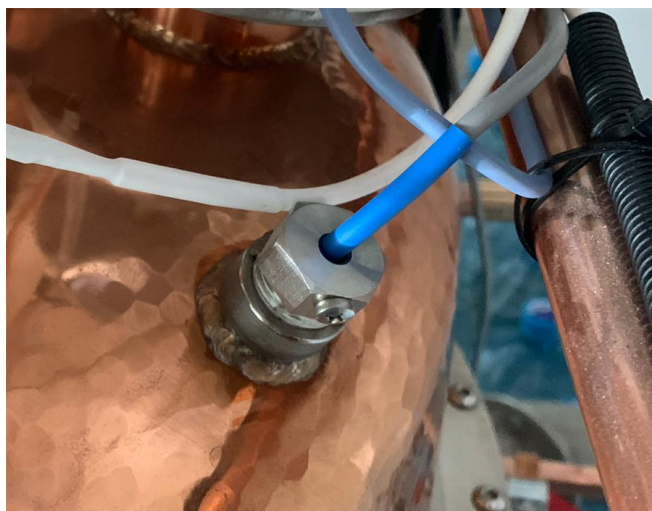
Obrázek 2.2: Kompletní PLC, včetně zapojení

2.2.2 Snímače

Pro ovládání kolony je třeba snímat několik různých veličin. Určitě nejdůležitější je

sledování teplot napříč kolonou. Pro účely řízení jsou důležité čidla sledující teplotu par nad kotlem, teplotu par nad deflegmátorem, teplotu chladiče a teplotu výstupního destilátu. Snímání teploty par nad kotlem je důležité pro sledování průběhu destilačního děje, jelikož teplota při postupném odpařování ethanolu postupně vzrůstá. Teplota par nad deflegmátorem slouží pro řízení chlazení deflegmátoru. Stejně tak teplota chladiče slouží pro řízení jeho chlazení. Nakonec teplota výstupního destilátu slouží pro kontrolu správného nastavení chlazení a pro teplotní korekci měření lihovitosti destilátu. Všechny teploty mohou zároveň sloužit jako kontrolní měření a při překročení definovaných hodnot systém vyhlásí chybový stav. Jako senzory teploty se využívají platinové jímkové snímače typu Pt100. To znamená odpor $100\ \Omega$ při teplotě $0\ ^\circ\text{C}$. Tyto snímače jsou umístěny v připravených jímkách ($\varnothing 6\ \text{mm}$) v příslušných částech kolony a zajištěny aretačním šroubkem. Pouze snímač teploty chladiče je umístěn na jeho plášti. Vždy se jedná o třívodičové připojení těchto čidel, které výrazně potlačuje vliv odporu přívodních vodičů a tím zpřesňuje měření. Byla vybrána následující čidla:

- GUENTHER 72-23301001-0300.0050.JJ.TM ($\varnothing 6 \times 50\ \text{mm}$) – 2 ks
- APAR SCPPT100A ($\varnothing 6 \times 100\ \text{mm}$) – 2 ks

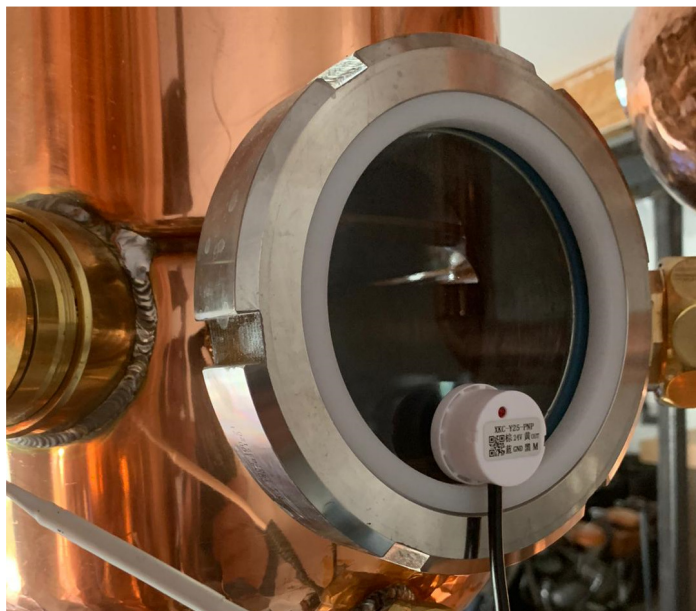


Obrázek 2.3: Umístění teplotního čidla v jímce

Další snímanou veličinou je lihovitost výstupního destilátu. Pro tyto účely slouží lihoměr plující v epruvetě. Způsob tohoto měření je popsán v kapitole 2.4. Zde pouze uvedu, že je využíván ultrazvukový senzor Micro Detectors UK1A/E1-0E.

Dále je možnost snímat hladiny v nádrži na úkap/dokap a ve vaporizační komoře. Při dosažení maximální hladiny ve vaporizační komoře je třeba otevřít ventil a kondenzát vypustit, jinak hrozí zalití cesty par kondenzátem. U nádrže na úkap/dokap je při dosažení maximální hladiny buď přepnout ventil do pozice jímání destilátu (při jímání úkapu), nebo otevřít ventil za nádrží (při jímání dokapu). Při překročení maximální hladiny by hrozilo přetečení destilátu odřukovou trubicí. Pro účely snímání hladiny jsou v zadních částech ponechány skleněné průzory, které je možné využít pro připevnění bezkontaktních kapacitních snímačů hladiny. Ty při dosažení hladiny změní hodnotu

výstupu. Pro naše účely byly zakoupeny čidla XKC-Y25-NPN. Ty jsou napájena napětím 24 V a typ NPN znamená, že při dosažení hladiny změní hodnotu na výstupu z 0 V na 24 V. Čidla jsou přizpůsobeny pro nalepení na skleněný průzor.



Obrázek 2.4: Čidlo hladiny vaporizační komory

V neposlední řadě je tu možnost využít jeden z otvorů pro jímky na plášti kotle pro snímání tlaku uvnitř. To je důležité především pro chybové situace, kdy by mohl tlak nepřiměřeně stoupnout a tím poškodit celé destilační zařízení. Zároveň existuje možnost snímat průtok chladicí vody, jednak také pro předcházení chybového stavu, kdy by byla zastavena dodávka vody, a jednak pro měření spotřeby vody. Tyto veličiny nejsou pro účely této práce uvažovány.

2.2.3 Akční členy

Prvním akčním členem systému jsou topné spirály kotle. Ty však již byly popsány v kapitole 2.2. Zde je pouze vhodné uvést, že použitá SSR relé pro jejich spínání je možno spínat pomocí napětí 5-30 V, tudíž mohou být přímo napojena na digitální výstupy příslušné karty PLC.

Dalšími akčními členy jsou ventily pro ovládání přítoku chladicí vody do deflegmátoru a chladiče. Ty jsou napojeny na dva nezávislé okruhy chladicí vody, proto lze chlazení obou zařízení nezávisle ovládat pomocí dvojice ventilů. Pro to slouží ventily Siemens VAG 61.15-1 DN15 s ovládacím servopohonem Siemens GQD161.9A. Ten je napájen napětím 24 V a ovládán napětím 0-10 V. Ten se natáčí o 90° a tím otáčí ventilem, který otevírá a uzavírá průtok vody. Servopohon má dobu přeběhu 30 s pro otevření a 15 s pro uzavření a je vybaven zpětnou pružinou, která při výpadku napájení uzavře ventil. Tak je zajištěno uzavření průtoku vody při výpadku celého systému (jelikož jsou zároveň odpojeny topné spirály, není nutné z důvodu bezpečnosti dále chladit, stačí

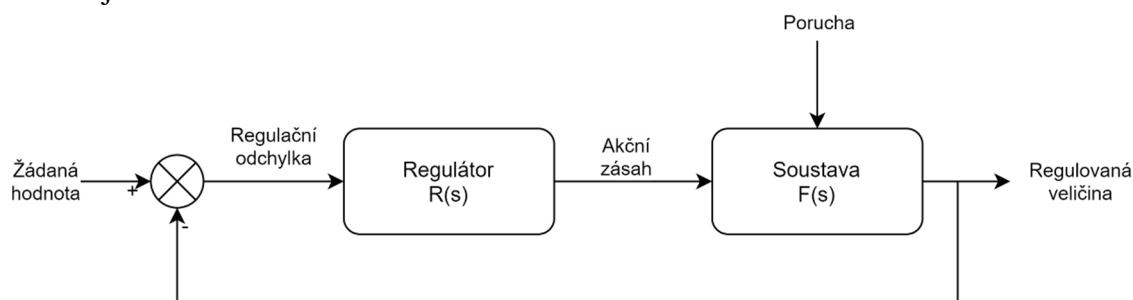
akumulace chladné vody). Servopohony dále disponují kontakty na měření napětí, které signalizuje jeho skutečné otevření (opět v rozsahu 0-10 V). Tím je možné zajistit snímání skutečné pozice ventilů.



Obrázek 2.5: Připevněný ventil VAG 61.15-1 DN 15 se servopohonem GQD161.9A

2.3 Regulace

Stěžejní částí práce a také hlavním důvodem tvorby tohoto projektu je regulace teplot na koloně. Nabízejí se zde tři okruhy regulace: regulace topení, regulace chlazení deflegmátoru a regulace chlazení chladiče. Tyto části kolony budeme uvažovat jako soustavy zapojené do uzavřené zpětnovazební smyčky s regulátorem, který bude realizován pomocí programu PLC, přičemž akční zásahy budou realizovány pomocí členů představených v předchozí kapitole. Děje a veličiny budou vysvětleny pomocí následujícího schématu.

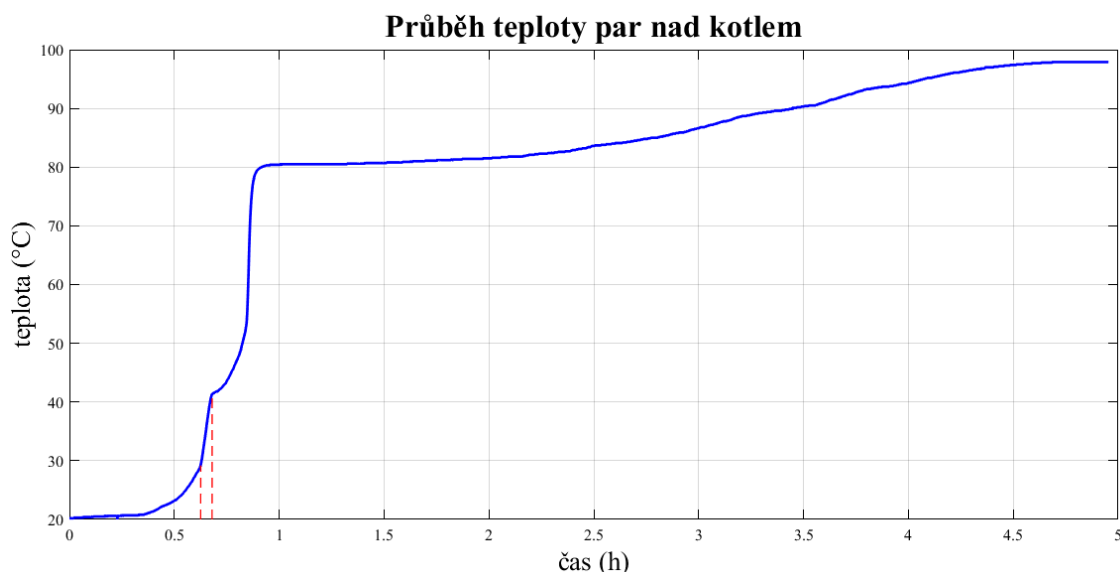


Obrázek 2.6: Schéma zpětnovazební regulační smyčky

Jak již bylo řečeno, jako soustavu si představíme chladič, deflegmátor nebo kotel s topnými spirálami. Regulovaná veličina, tím pádem i námi snímaná veličina, je teplota. Akčním zásahem budeme chápat spínání spirál kotle nebo otevírání ventilu chladicí vody. Pro soulad veličin musí být žádaná hodnota i regulační odchylka teploty, přičemž

regulační odchylkou chápeme rozdíl žádané a skutečné teploty. Co se týče poruch, mohou vstupovat jak na vstupu, tak na výstupu soustavy. Zde je pro jednoduchost znázorněna jako porucha vstupující do soustavy. Poruch, které mohou ovlivňovat regulaci na destilační koloně je více, a budou probírány v dalších částech práce.

Hned v prvním případě regulace, a to regulace topení v kotli, narážíme na problém chování směsi v kotli při jejím odpařování. Cílem regulace by totiž mělo být souvislé odpařování směsi ethanolu, vody a dalších příměsí. Jak ale vyplývá ze zákonů termodynamiky, při přeměně z jednoho skupenství do druhého, zůstává při konstantním tlaku konstantní teplota. Tím nastává problém při regulaci na určitou teplotu, jelikož i při znalosti přesné teploty varu bychom naráželi na problémy nastavení regulace. Dalším problémem ovšem je, že ne vždy je teplota varu stejná. Liší se v závislosti na složení směsi uvnitř kotle, která může být při každé destilaci odlišná. Dále narážíme na fakt, kdy při postupném odpařování ethanolu zůstává ve směsi v kotli stále větší podíl vody, a tím stále roste teplota varu. Tato změna teploty varu, a tím i nárůst teploty par nad kotlem, je závislá na rychlosti odpařování a na složení a objemu směsi. Nakonec narážíme skutečnost technického uspořádání kolony a jímek pro měření teploty, kdy nesnímáme teplotu směsi uvnitř kotle, ale teplotu par nad ním. Můžeme tedy říct, že teplota par nad kotlem vykazuje vlastní chování, které nejsme schopni regulovat pomocí řízení výkonu topných spirál kotle. Vzhledem k této skutečnosti je závěr takový, že opustíme myšlenku regulovat topení kotle, ale budeme výkon topných spirál pouze ovládat. Pro správné ovládání je ale nutné znát několik konsekvencí vyplývajících z předchozích poznatků. To, že snímáme teplotu par zapříčiní, že tato teplota bude i při postupném zahřívání směsi uvnitř kotle zůstávat konstantní, nebo se bude pouze nepatrně zvyšovat. Až při dostatečném prohřátí kotle a směsi se začnou postupně odpařovat těkavé látky a teplota začne prudce růst až na hodnotu teploty varu. Tento nárůst teploty je velmi strmý. Dalším faktorem ovlivňujícím tuto teplotu je promíchávání směsi. Pokud směs od začátku zahřívání nepromícháváme, neuvolňují se páry rychle, a nárůst teploty při dosažení varu je velmi strmý. Pokud tuto směs budeme promíchávat, směs se bude zahřívat rovnoměrněji a také páry se budou uvolňovat rychleji. Pokud dojde k zapnutí míchání během zahřívání, můžeme pozorovat náhlý nárůst teploty, který po ukončení míchání opět poklesne. Všechny tyto skutečnosti jsou patrné na následujícím grafu.



Obrázek 2.7: Průběh teploty par nad kotlem

Červenými čarami je naznačeno zapnutí a vypnutí míchání, kde je vidět razantní nárůst teploty při zapnutí a zpomalení nárůstu při vypnutí. Také je vidět zmiňované postupné zvyšování teploty par (po dosažení teploty varu) způsobené odpařováním ethanolu a zvyšováním podílu vody ve směsi.

Pro efektivní zahřívání směsi je třeba při zahájení destilace zvýšit výkon spirál na maximum. To způsobí rychlé zahřátí směsi. Je ovšem důležité odhadnout chvíli, kdy je velký nárůst teploty. To znamená že je směs zahřátá a začíná se odpařovat. V této chvíli je žádoucí snížit výkon spirál jednak kvůli velké spotřebě elektrické energie při plném výkonu za účelem hospodárného procesu, a jednak pro udržení pozvolného vypařování, které je důležité pro správný proces destilace a kvalitu destilátu. Tato chvíle se dá odhadnout podle teploty par, kterou nazveme teplotou zvratu. Tato teplota nastává asi v intervalu 45-55 °C. Při dosažení této teploty je nutné snížit výkon asi na 30-50 % maximálního výkonu. Tyto hodnoty jsou pouze orientační a jejich přesná hodnota závisí na koloně i na směsi v kotli. Konkrétní hodnota teploty zvratu pro znázorněnou destilaci byla 51 °C a výkon snížen na 40 %. Tyto hodnoty je nutné empiricky zjistit a v případě potřeby vhodně upravit.

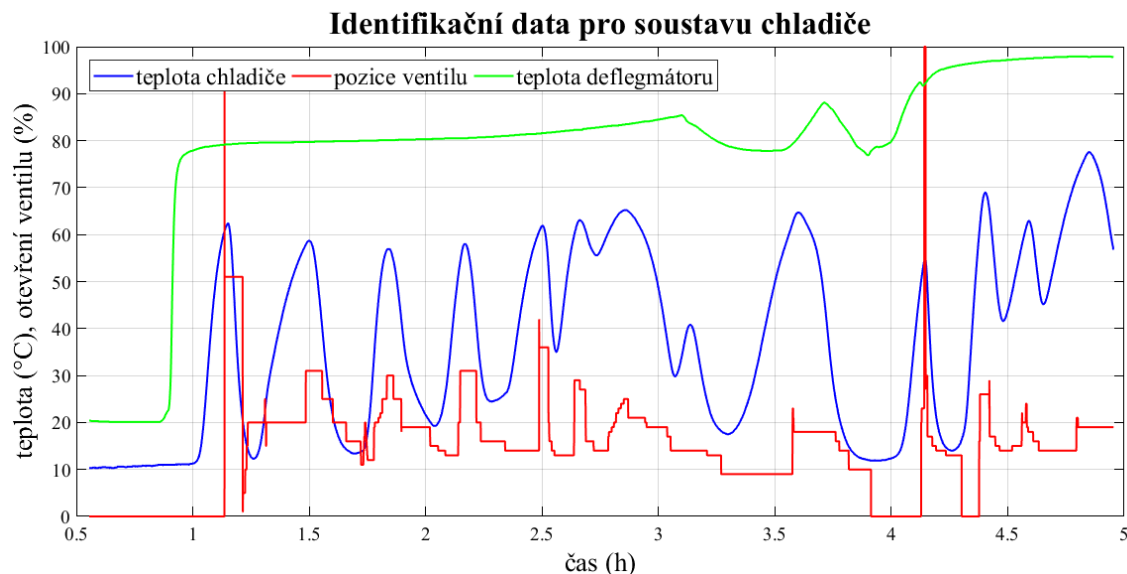
Pro regulaci tedy zbývá chlazení deflegmátoru a chladiče. Jde v podstatě o dva stejné technologické celky, které se liší funkcí a velikostí. Účelem deflegmátoru bude pouze ochlazovat páry, přičemž účelem chladiče bude kondenzace par a zchlazení destilátu. Z toho plynou i požadavky na regulaci. Udržování teploty nad deflegmátorem v definovaných mezích je důležité, jelikož změnou této teploty se změní i lihovitost vytékajícího destilátu, na které je především při konečné fázi destilace (kdy již je směs v kotli chudší na ethanol) velice závislá i kvalita destilátu, kdy se při snižující lihovitosti objevují esence negativně ovlivňují chuť i aroma. Z hlediska technologických požadavků jsou maximální meze kolísání teploty ± 1 °C od definované hodnoty, přičemž optimální

regulace představuje udržení teploty v intervalu $\pm 0,5$ °C od definované hodnoty. Naproti tomu teplota na chladiči je podstatně méně důležitá. Zde je důležité, aby zkondenzovaly páry (to znamená teplotu nižší než 78,3 °C – kondenzace ethanolu), a také aby došlo k určitému zchlazení stékajícího destilátu na teplotu cca 15-30 °C. Zde není definovaný přesný interval, neboť nízké hodnoty teploty destilátu nejsou nijak směrodatné pro výslednou kvalitu destilátu, pouze dochází ke zbytečnému zchlazování a tím i zbytečné spotřebě chladicí vody. Horní hranice teploty by ale neměla přesáhnout 35 °C, kdy již dochází k úniku aromatických látek do vzduchu. Od teploty vytékajícího destilátu tedy budeme odvozovat teplotu chladiče. Ta byla empiricky zjištěna na hodnotu v intervalu 45-55 °C. Z toho plyne i interval hodnot, kterým by se měla teplota pohybovat, a to ± 5 °C. Jelikož je čidlo umístěné na plášti chladiče, závisí požadovaná hodnota i interval rozkmitu teploty na části chladiče, kde bude čidlo umístěno. Tyto hodnoty korespondují s umístěním v polovině výšky chladiče, přičemž s posunutím čidla vzhůru se budou teploty zvyšovat (jelikož zde proudí horké páry a tím je i teplota na plášti vyšší). Problematika umístění čidla bude značně ovlivňovat výsledky regulace. To bude rozebráno v jedné z následujících kapitol.

2.3.1 Identifikace soustav

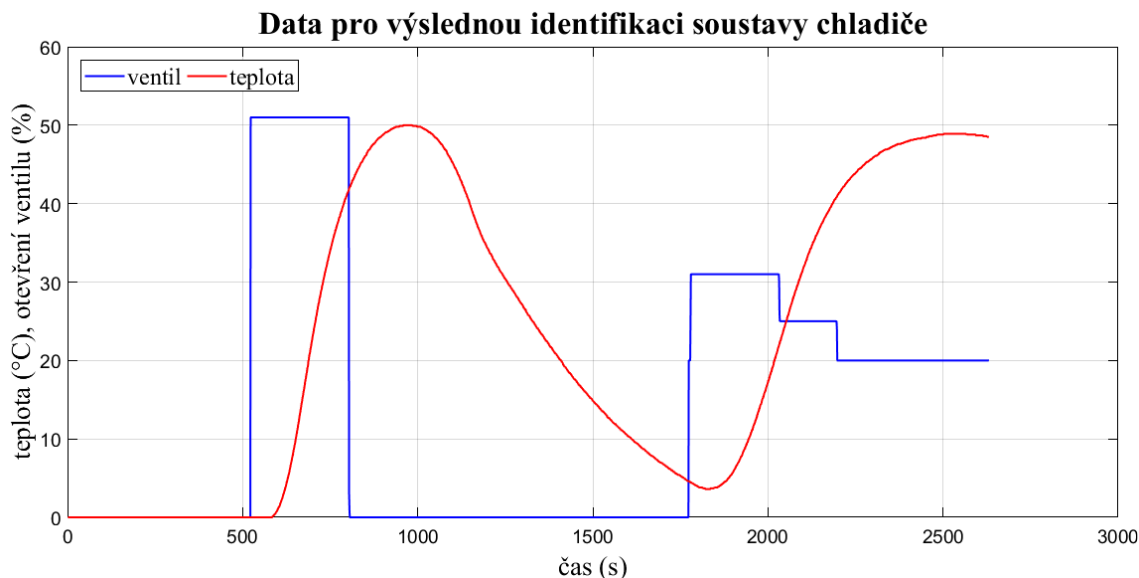
Prvním krokem k úspěšné regulaci je znalost chování regulovaných soustav, a to v podobě rovnic přenosu. Procesu získávání těchto přenosů říkáme identifikace. Existuje více metod identifikace, ale pro všechny je důležité zjistit, jak soustava reaguje na určitý akční zásah. Proto bylo nejdříve nutné připravit systém pro zajištění akčního zásahu a zároveň pro měření potřebných veličin. Jelikož jde ale o reálné destilační zařízení v provozu, nebylo možné pouze testovat a měřit, ale získávání dat bylo nutné realizovat za provozu. Ovládací systém byl tedy pro první použití připraven na úrovni dosavadního manuálního ovládání. Byly tedy uskutečňovány příslušné akční zásahy, na které soustavy reagovaly. Tyto zásahy bylo ovšem nutné realizovat v příslušných mezích tak, aby byl zachován chod destilační kolony. Tím nemohlo být dosaženo krajních a ustálených hodnot soustav, což bude mít za následek nedokonalou identifikaci soustav. Bohužel ale z výše zmíněných důvodů nebyla vhodnější možnost, která by nevedla k ekonomickým ztrátám.

V první fázi byla tedy naměřena data získaná při prvotním ovládání kolony pomocí ovládacího systému. Tyto data jsou zobrazena v následujících grafech. Pro jejich zpracování a identifikaci bude využit program Matlab s jeho funkcí *System Identification Toolbox*, která slouží právě pro identifikaci soustav z dodaných průběhů akčních zásahů (vstupů) a odezev (výstupů) soustav. Nejprve bude řešena soustava chladiče.



Obrázek 2.8: Data pro identifikaci soustavy chladiče

Pro názornost chování soustavy je v předchozím grafu uvedena i teplota par nad deflegmátorem, které poté proudí do chladiče. Je vidět, jak tyto páry mění teplotu ovlivňují dynamiku soustavy. Z toho vyplývá, že pro identifikaci nemůžeme použít data z celého průběhu, ale pouze z počáteční fáze destilace, kdy dynamika nebude ovlivněna chlazením deflegmátoru. Pokud budeme uvažovat rychlejší dynamiku na počátku destilace, jsme schopni při takovém nastavení regulátoru regulovat jak tyto rychlé děje, tak i pomalejší děje při nižších teplotách vstupních par. Je tedy nutné vzít v úvahu pouze počáteční data, a tato data dále náležitě upravit. Jedna z potřebných úprav je zajistit nulové počáteční podmínky. Dále je třeba upravit data tak, aby na kladný akční zásah následovala kladná odezvy systému. I když se tato soustava chová opačně, kdy pro otevření ventilu (kladný akční zásah) teplota klesá (záporná odezva), pro účely identifikace musíme uvažovat klasický lineární systém. V tom spočívá i „vymazání“ dat, které způsobují chování napodobující nelineární systém. To může být i tak malé otevření ventilu, kdy chlazení není dostatečné, a teplota začne stoupat. Z hlediska lineárního systému není možné na určitý kladný zásah kladná odezva a na jiný kladný zásah záporná odezva. Byla tedy vybrána vhodná data a ta byla upravena dle předchozích definicí.

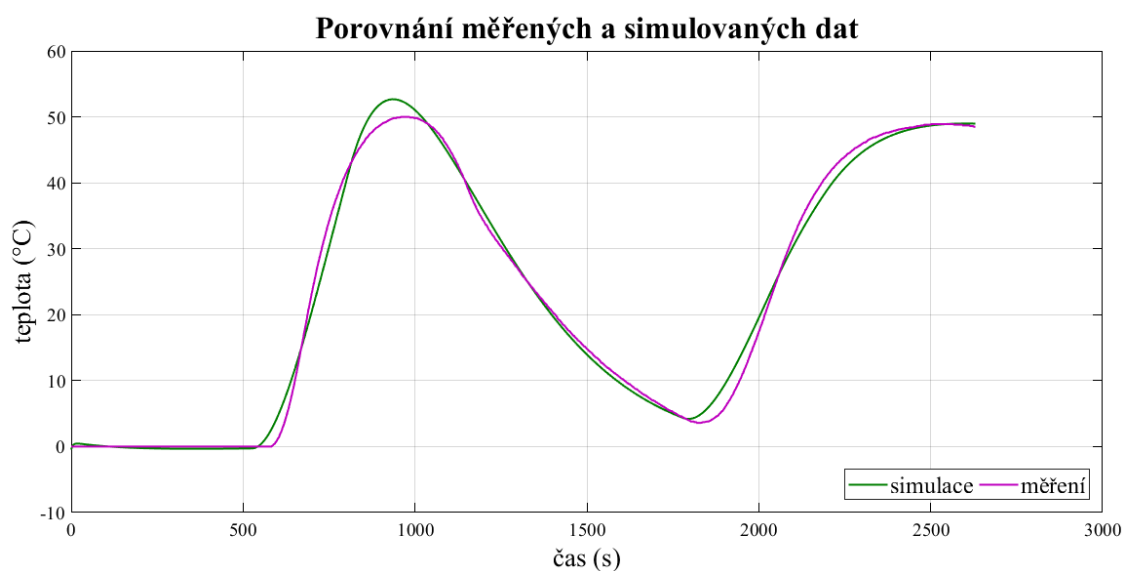


Obrázek 2.9: Upravená data pro identifikaci soustavy chladiče

Je vidět, že tato data jsou značně upravená, nicméně z nich získáme odhad přenosu soustavy. Po nahrání dat do System Identification Toolboxu musíme rovněž zadat řád systému. Je zřejmé že se bude jednat o systém vyššího řádu. Bylo experimentováno s různými řády systému, avšak nejlepší shodu dostáváme při systému třetího řádu. Výsledná rovnice přenosu:

$$F_{ch}(s) = \frac{1,023 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0,253s^2 + 0,00187s + 4,372 \cdot 10^{-6}} \quad (2.1)$$

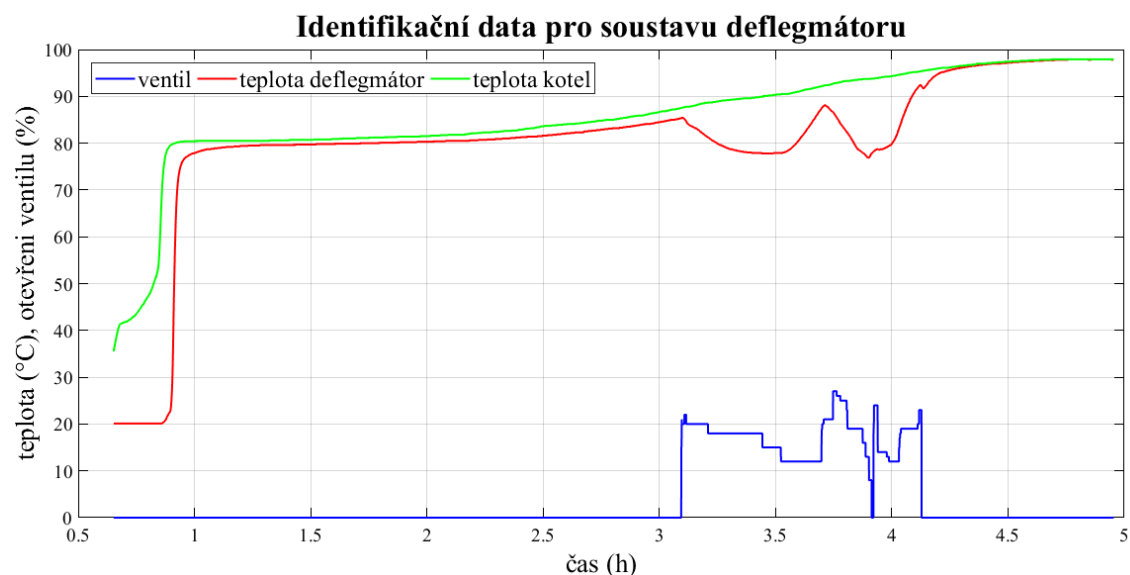
Porovnání odezvy identifikovaného systému s naměřenými daty (shoda 92,08 %):



Obrázek 2.10: Porovnání výsledku identifikace chladiče s naměřenými daty

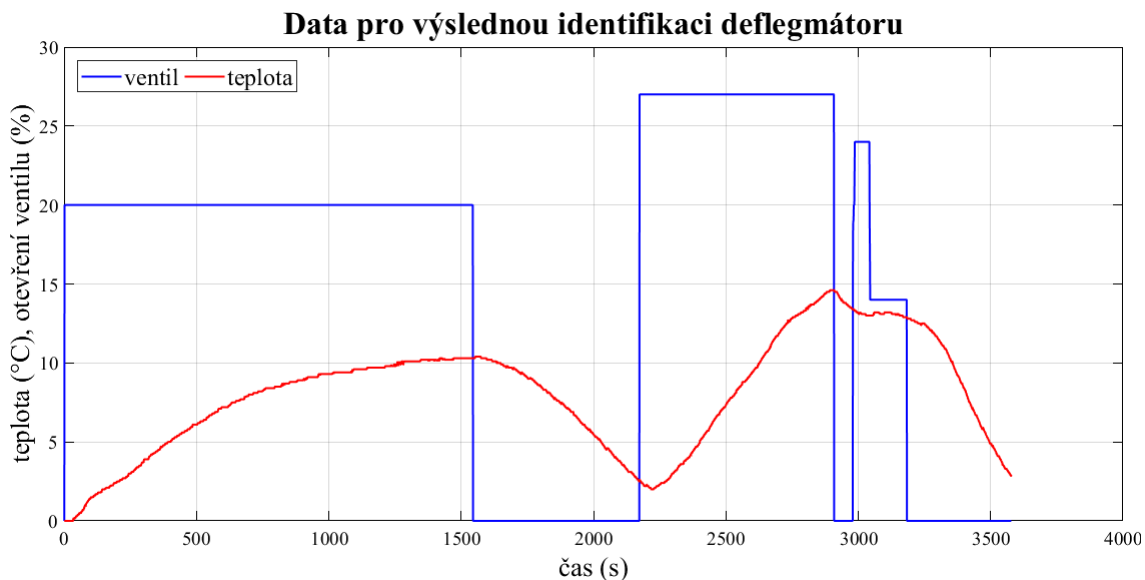
Musíme si ovšem uvědomit, že se jedná pouze o odhad, a že došlo ke značnému zjednodušení při výběru dat. Tento odhad ale slouží především pro určení dynamiky systému, na kterou budeme při regulaci náležitě reagovat.

Při identifikaci soustavy deflegmátoru budeme postupovat stejným způsobem, jako u soustavy chladiče. Nejprve se ukážeme výchozí naměřená data.



Obrázek 2.11: Data pro identifikace soustavy deflegmátoru

Na zobrazeném průběhu můžeme pozorovat, že dat pro identifikaci je velice málo, jelikož deflegmace probíhá pouze v konečné fázi destilace. Navíc zde bylo velké omezení na možnost akčního zásahu, jelikož není vhodné příliš zchladit deflegmátor (dochází k zastavení proudění par), a rovněž není žádoucí nechat deflegmátor ohřát (jelikož zde pak proudí nežádoucí páry s nízkým obsahem ethanolu). Rovněž si musíme uvědomit, že se neustále zvyšuje teplota vstupující páry (rovněž znázorněná v grafu), která ohřívá deflegmátor se stále větší intenzitou, což bude do identifikace vnášet značnou chybu. Proto byla tato chyba kompenzována odečtením vstupující teploty, a teprve poté byla data dále zpracována. Tím získáme skutečnou představu o míře zchlazení deflegmátoru.

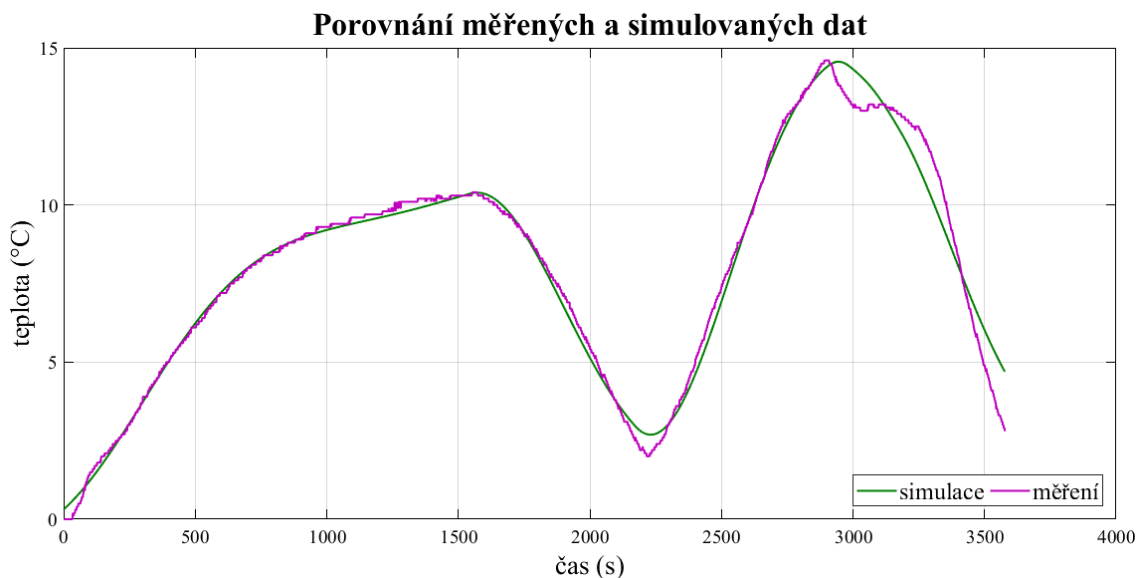


Obrázek 2.12: Upravená data pro identifikaci soustavy deflegmátoru

Po zpracování dat pomocí System Identification Toolboxu opět získáme odhad přenosu soustavy:

$$F_d(s) = \frac{4,547 \cdot 10^{-6}s + 1,941 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0,0045s^2 + 3,031 \cdot 10^{-5}s + 3,196 \cdot 10^{-8}} \quad (2.2)$$

Porovnání odezvy identifikovaného systému s naměřenými daty (shoda 87,18 %):



Obrázek 2.13: Porovnání výsledku identifikace deflegmátoru a naměřených dat

Opět jde pouze o odhad pro určení přibližné dynamiky systému. Oba systémy totiž zároveň vykazují nelineární chování. Především jde o princip chlazení, kdy při určitém akčním zásahu dojde ke zchlazení na teplotu blízkou teplotě vstupní vody. Ovšem při zvýšení akčního zásahu již k dalšímu zchlazení nedojde.

2.3.2 Návrh regulátorů

Pro identifikované soustavy je třeba navrhnout vhodný regulátor. Budeme uvažovat PID regulátor, který bude reagovat jak na aktuální regulační odchylku (proporcionální složka), dokáže vyregulovat vznikající chyby (integrační složka) a zároveň zareaguje na narůstání regulační odchylky (derivační složka). Jak již bylo zmíněno, do vstupu regulátoru vstupuje regulační odchylka a na jeho výstupu se poté objeví vypočítaný akční zásah. Přenos PID regulátoru můžeme popsat touto rovnicí:

$$R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right) \quad (2.3)$$

kde K_p je zesílení regulátoru, T_i je integrační časová konstanta, T_d je derivační časová konstanta a T_f je filtrační časová konstanta. Filtrační složka v regulátoru zajistí filtraci derivace, která by mohla nepřiměřeně reagovat na šum.

Pro návrh regulátorů je opět využit program Matlab, tentokrát nástroj *Control System Designer*. Ten funguje tak, že nejprve importujeme identifikovaný přenos (viz předchozí kapitola). Zde se nám zobrazí jeho frekvenční charakteristika včetně pólů a nul. Poté můžeme vhodnou volbou regulátoru výslednou charakteristiku upravovat, a to tak, že vkládáme póly a nuly regulátoru a vhodně je umísťujeme. U PID regulátoru se jedná o dvě nuly a jeden pól (filtrační složka). Jelikož předpokládáme pouze orientační identifikaci soustav, není třeba velice přesně nastavit regulátor již pomocí tohoto nástroje. Budeme předpokládat určité prvotní nastavení regulátorů, které bude nutné dále upravit. Proto zde nebude příliš rozebírána problematika tohoto prvotního nastavování, ale budou pouze zmíněny přenosy prvotních návrhů.

Regulátor chladiče:

$$R_{ch}(s) = 5,88 \left(1 + \frac{1}{456s} + \frac{109s}{10,3s + 1} \right) \quad (2.4)$$

Regulátor deflegmátoru:

$$R_d(s) = 4,04 \left(1 + \frac{1}{387s} + \frac{93,1s}{7,2s + 1} \right) \quad (2.5)$$

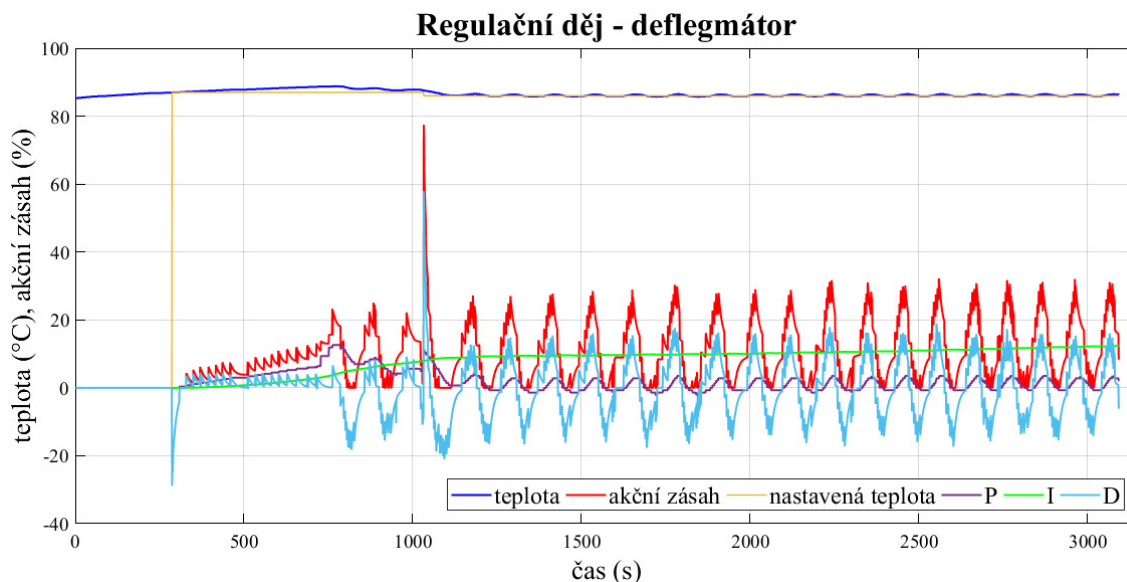
Tyto přenosy vložíme do příslušného bloku v programu PLC. Ještě je nutné nastavit omezení akčního zásahu regulátorů, který bude probíhat v intervalu 0-100 % otevření ventilu. Poté je již možné vyzkoušet funkčnost regulátorů.

2.3.3 Výsledky regulace

Při uvádění výsledků návrhů do praxe opět narážíme na technologické omezení. Zde nastává omezení počtu cyklů destilace, kdy můžeme systém testovat pouze při provádění destilace (která je požadována v nepravidelných a relativně dlouhých intervalech – v řádu dnů až týdnů). Dále při již započatém procesu nesmíme tento proces přerušit a znovu započít, protože by se mohl znehodnotit výsledek celé destilace. Z toho plynou opravdu omezené možnosti testování a úpravy systému.

Při testování nastavení regulátorů byla pro účely úprav parametrů zaznamenávána veškerá dostupná data, to znamená výstup z regulátoru (akční zásah), nastavená požadovaná hodnota a také vnitřní parametry regulátoru – proporcionální, integrační a derivační složka.

Nejdříve budou představeny výsledky regulace teploty deflegmátoru.



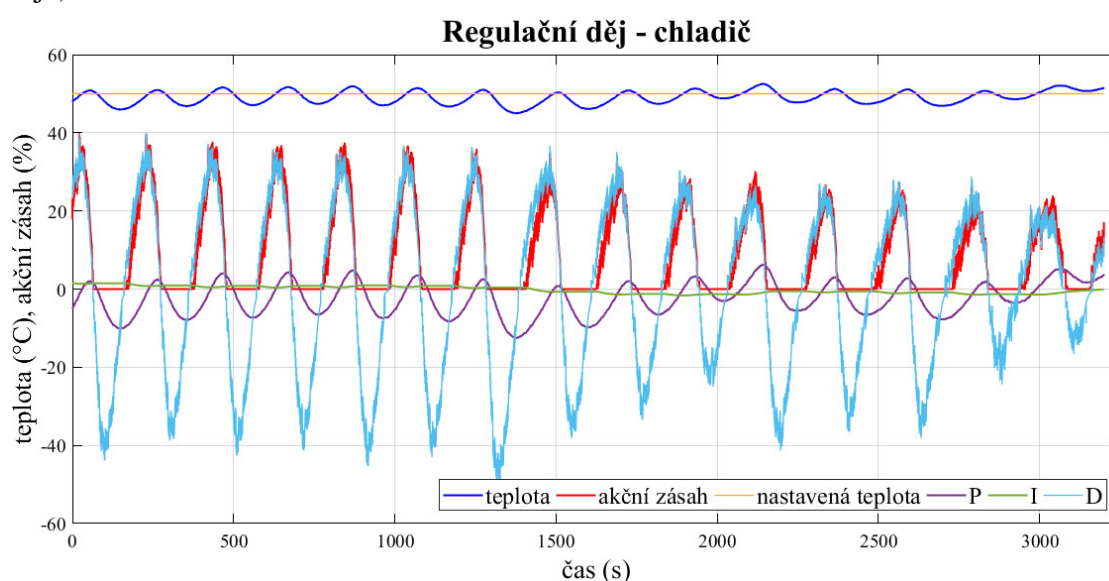
Obrázek 2.14: Průběh regulace teploty deflegmátoru

Podstatná věc, která je názorná na předchozím grafu, je spuštění regulace. Ta je spuštěna při určité teplotě, která má být následně udržována (v tomto případě je počátek regulace při hodnotě 88 °C). To je ale zásadní problém regulace, jelikož v okamžiku spuštění jsou všechny hodnoty nulové, včetně regulační odchylky. Nulová regulační odchylka způsobí to, že regulátor nijak nezareaguje. Teplota ale vlivem dříve popsáných dějů stále stoupá, takže regulátor začíná nepatrně reagovat až při přesažení požadované teploty. Tyto hodnoty jsou ovšem nízké, a tím je i nízký nárůst složek regulátoru, a tudíž i celkového akčního zásahu. Zejména integrační složka vlivem nízkých rozdílů a pomalých časových konstant narůstá velmi pomalu. Toto způsobuje, že teplota deflegmátoru dále roste nad hranici požadované teploty, a to nezanedbatelným rozdílem. V tomto případě je nejvyšší rozdíl hodnot 1,7 °C, což je již mimo přijatelnou odchylku regulace. Rozdíl by byl ještě vyšší, kdyby v průběhu regulace nedošlo k úpravě parametrů. Ty můžeme pozorovat v čase $t = 730$ s. Zde došlo ke zvýšení zesílení na hodnotu $K_p = 7,0$. Dle rovnice (2.3) to znamená zesílení všech tří složek regulátoru. To sice pomohlo k rychlejšímu dosažení požadované hodnoty, ovšem problém s počátečním nárůstem odchylky zvýšení zesílení neodstraní. Při pohledu na graf je patrné, že problém s narůstáním odchylky je potlačen až při dostatečné hodnotě integrační složky. Zvýšení rychlosti integrace by tedy mohlo zrychlit vyřešení problému, ale opět nevyřeší jeho původ, a to nulové počáteční podmínky. Zde by mohlo řešení tohoto problému spočívat v nastavení počáteční podmínky integrátoru na určitou hodnotu, která by přibližně

odpovídala ustálené hodnotě integrační složky, v tomto případě hodnotu cca 8-9 (%). To by znamenalo již v počáteční fázi regulace určitý akční zásah, který by ostatní složky upravily podle následného vývoje teploty. Přesnou (nebo alespoň přibližnou) hodnotu počáteční podmínky integrátoru je nutné určit experimentálně.

Dalším problémem je kmitání výsledné teploty. Možná příčina tohoto děje bude vysvětlena později. Výsledek regulace po ustálení je kmitání v rozsahu od -0,2 do +0,5 °C od zadané hodnoty, což i přes kmitavý průběh znamená uspokojivý výsledek podle daných technologických požadavků.

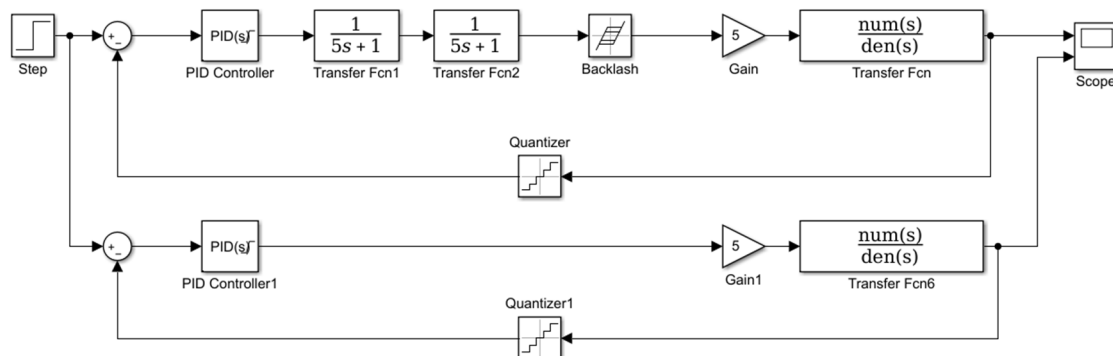
Na dalším grafu budeme pozorovat chování regulace teploty chladiče. Zde znázorněná data představují pouze část regulačního děje (cca 53 minut – ustálená část děje).



Obrázek 2.15: Průběh regulace teploty chladiče

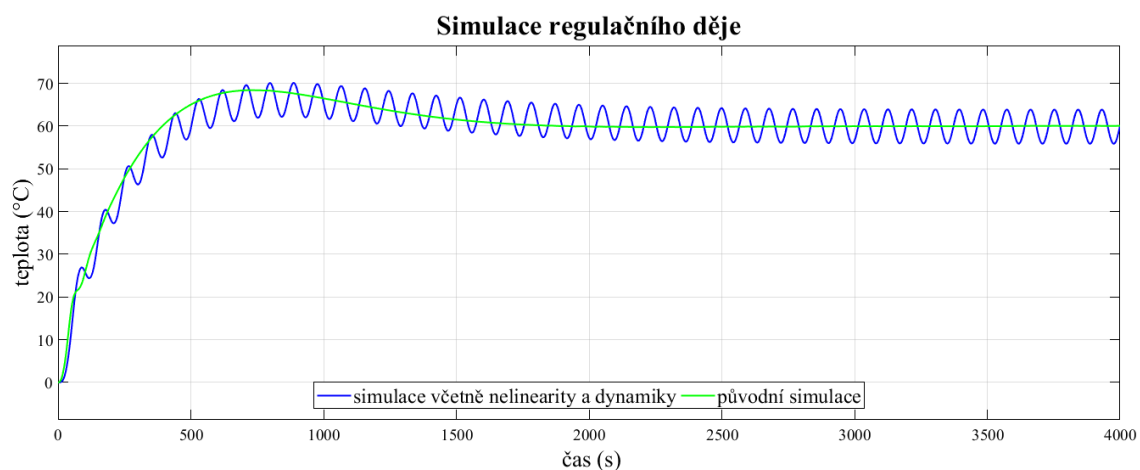
Opět jsou znázorněny veškeré parametry. Nemůžeme si nepovšimnout výrazného kmitání teploty, které akční zásah regulátoru není schopný omezit. Toto chování má různé příčiny. V první řadě je to samotný akční zásah, který se pohybuje v intervalu 0-100 %. Hodnoty uvnitř regulátoru ovšem klesají pod hodnotu 0, čímž se snaží regulovat klesající teplotu, ovšem na výstupu jsou tyto hodnoty oříznuty. To bohužel nejde změnit vzhledem k uspořádání funkčního bloku regulátoru uvnitř ovládacího programu. Dále vidíme nevýraznou integrační složku, která by měla udržovat částečně otevřený ventil po celou dobu regulace, a tím omezit vliv záporných složek a ořezání akčního zásahu (jako u regulace teploty deflegmátoru - Obrázek 2.14). To je způsobeno tím, že teplota dlouhodobě nevystoupá nad požadovanou hodnotu, a tím není zajištěn dlouhodobá kladná regulační odchylka pro nárůst integrační složky. Akční zásah ovlivňuje především derivační složka. Ta sice zajistí, aby při velkém narůstání teploty bylo zajištěno adekvátní chlazení, ale při jejím poklesu naopak ventil ihned uzavře. Ovšem změna derivační časové konstanty není finálním řešením, je nutné znát ostatní souvislosti celého děje.

Do procesu vstupuje řada nelinearit, které negativně působí na snahu řídit systém (jeho lineární náhradu). V první řadě je to sám systém, který vykazuje známky nelinearity. Dále jde samozřejmě o samotný ventil, který jednak disponuje vlastní dynamikou (otevření i zavření vyžaduje nezanedbatelný čas), a jednak může vykazovat nelinearitu typu vůle v převodech. Tyto skutečnosti můžeme simulovat a srovnat s výsledky simulace bez nelinearity a dynamiky ventilu.



Obrázek 2.16: Schéma simulace nelinearity a dynamiky ventilu

Na obrázku č. 2.14 můžeme vidět přidání dynamiky (Transfer Fcn 1 a 2) a vůle v převodech (Backlash). Také byla přidána kvantizace měření (Quantizer), protože teplotu měříme se zaokrouhlením na 0,1 °C. Zároveň je zde klasická regulační smyčka pro srovnání dat. Do bloku regulátoru byly vloženy stejné parametry, které byly použity při destilaci, a parametry soustavy jsou shodné s výsledky identifikace.



Obrázek 2.17: Výsledek simulace

Na výsledku simulace (Obrázek 2.17) můžeme vidět rozkmitání regulace srovnané s běžnou simulací bez nelinearit a přidáných dynamik. Toto rozkmitání přibližně odpovídá kmitání skutečného systému. Je tedy zřejmé, že dynamika ventilu a jeho vůle v převodech jsou rovněž původci rozkmitání systému. Toto rozkmitání (v menší míře)

pozorujeme i u regulace deflegmátoru. I zde je způsobené stejnou příčinou, jelikož používáme stejné ventily a servopohony.

V neposlední řadě ovlivňuje výsledek regulace podstatná časová odezva systému, způsobená umístěním teplotního čidla. Na rozdíl od ostatních čidel, které jsou umístěné v jímkách, je toto přiložené na plášti chladiče, jelikož se zde jímka nenachází. Čidlo bylo provizorně umístěno na plášť a také provizorně aretováno (viz Obrázek 2.18). To přináší velké zpoždění při měření teploty a zároveň určitou chybu. Umístění čidla do jímky (zde byl vznesen požadavek na výrobce kolony) by jistě pomohlo ke zkvalitnění regulace.



Obrázek 2.18: Provizorní umístění čidla chladiče

Výsledek regulace teploty chladiče je tedy rozkmit teploty od $-5,0$ do $+2,5$ °C, což i přes celkovou nedokonalost regulace vyhovuje technologickým požadavkům. S výše zmíněnými poznatky ale lze regulaci zlepšit. V době tvorby této práce ovšem již nebyla další příležitost k testování a úpravám systému.

2.4 Měření obsahu alkoholu

Jedním z podstatných prvků destilace je kontinuální měření obsahu alkoholu ve výsledném destilátu. Běžně se u destilačních kolon využívá epruvety s lihoměrem, kde obsluha může pozorovat koncentraci alkoholu v destilátu v reálném čase. Pro účely automatizace je ovšem nutné toto měření převést do podoby kontinuálních dat, které je následně možno automaticky zpracovat (v našem případě pomocí PLC). Jelikož neexistuje snímač, který by dokázal přímo měřit koncentraci alkoholu, bylo nutné vymyslet řešení, které by využívalo lihoměr v epruvetě. Zde se nabízí varianta snímání pomocí průmyslové kamery. Ze snímku lihoměru by se za pomoci systémů počítačového vidění detekovala hladina destilátu a k ní příslušná hodnota na stupnici. K tomu by mohlo rovněž dopomoci libovolné zbarvení lihoměru, které by na jeho funkci nemělo vliv. Toto řešení je ovšem při ceně průmyslových kamer pro naše účely neekonomické, navíc by bylo zpracování obrazu z kamery značně výpočetně náročné pro systém PLC. Proto bylo navrženo řešení, které snímá polohu lihoměru, a z této polohy následně vypočítá

příslušnou koncentraci alkoholu. Zde přichází v úvahu hlavně bezkontaktní způsob měření, jelikož kontaktní způsob by mohl způsobovat jednak velké ovlivnění lihoměru případnými přípravky, a jednak by výrazně vizuálně znehodnotil estetičnost kolony.

Výsledná podoba snímání lihoměru tedy sestává ze snímače vzdálenosti, který je umístěn nad lihoměrem. Zde bylo třeba rozhodnout o typu snímače. Celkem připadaly v úvahu dvě varianty, laserový a ultrazvukový snímač. Co se týče vhodných parametrů, lepším z těchto dvou typů by byl laserový snímač vzhledem k minimálnímu vyzařovacímu úhlu a rozsahu měření. Z ekonomického hlediska je ovšem nevýhodný, jelikož jeho cena několikrát převyšuje cenu snímače ultrazvukového. Bylo tedy rozhodnuto o použití ultrazvukového snímače. Zde je ovšem nutno počítat s nezanedbatelným vyzařovacím úhlem senzoru, potřebou určité velikosti odrazné plochy, a především s pásmem necitlivosti (tzv. mrtvá zóna). Jako vhodný snímač byl vybrán ultrazvukový snímač UK1A/E1-0E od výrobce Micro Detectors. Tento snímač má pro naše účely dostatečný rozsah 50–400 mm a analogový výstup 0–10 V.

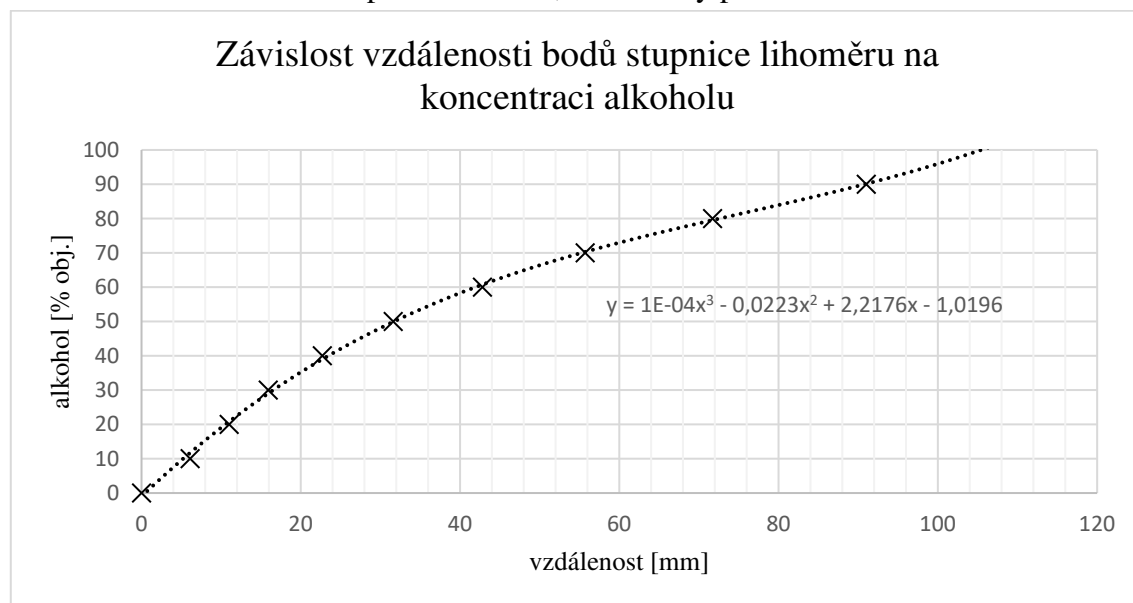
Dalším úkolem bylo zajistit potřebnou odraznou plochu na vrcholu lihoměru. Byl vytvořen model odrazné plochy, pro představu se jedná o „terčík“, který byl umístěn na vrchol lihoměru (viz Obrázek 2.19), kde při bližším pohledu spatříme na vrcholu stopky lihoměru připevněnou odraznou plochu). Bylo nutné zajistit jednak potřebné rozměry pro odraz ultrazvukového signálu, jednak dostatečně malou hmotnost, aby odrazná plocha svojí vahou příliš neovlivňovala měření lihoměru. To sice bude částečně ovlivněno, ovšem takto vzniklou chybu dokážeme eliminovat pomocí následných výpočtů.



Obrázek 2.19: Měření lihovitosti v epruvetě

Nyní bylo potřebné ze snímané vzdálenosti vypočítat výslednou koncentraci alkoholu. K tomu je potřebné znát vzdálenosti jednotlivých bodů stupnice na lihoměru, a také referenční bod vzdálenosti lihoměru od snímače. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5.1

a také v grafu na obrázku č.Obrázek 1.11, je závislost koncentrace alkoholu na hustotě nelineární. Tím pádem je rovněž nelineární stupnice na lihoměru. Proto bylo nutné tuto závislost proložit vhodnou křivkou tak, abychom pomocí výsledné rovnice dokázali vypočítat koncentraci. Toto měření můžeme vidět na následujícím grafu, kde je měřena vzdálenost od bodu 0 na stupnici lihoměru, a k ní vždy příslušná hodnota koncentrace.



Obrázek 2.20: Charakteristika stupnice lihoměru

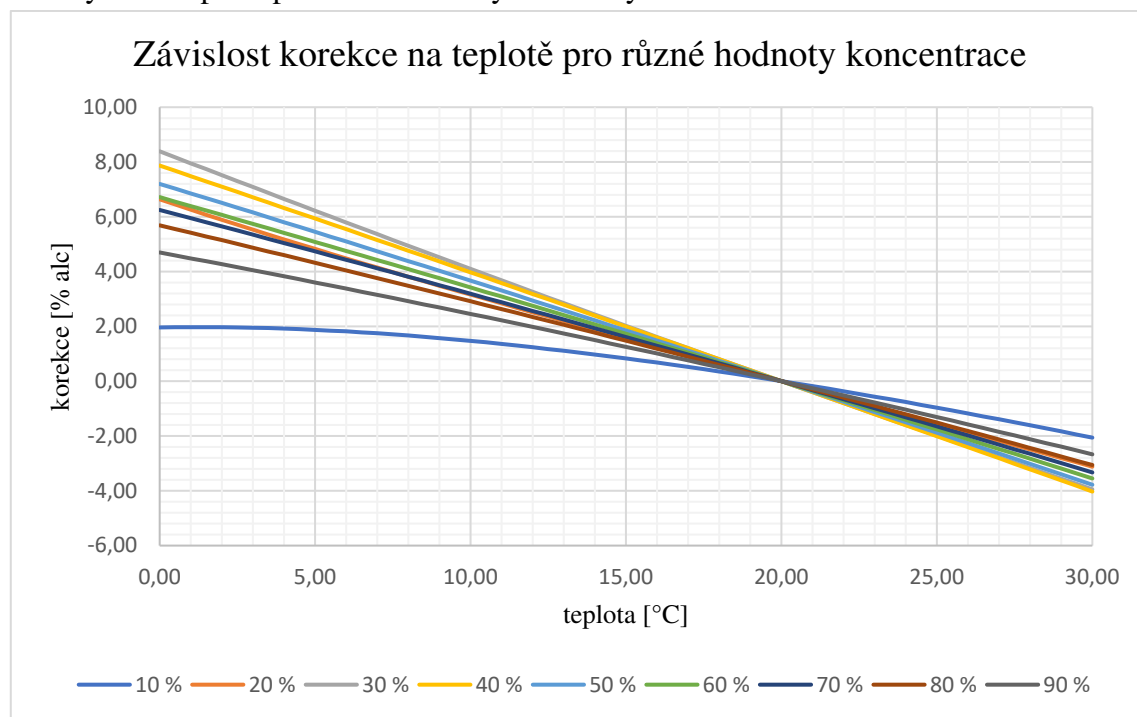
Můžeme si všimnout, že výsledná závislost se dá aproximovat polynomem třetího řádu. Pro různé lihoměry se ovšem může výsledná závislost lišit, proto je nutné mít možnost změny parametrů polynomu. Tento problém je řešen tak, že uživatel sám zadá naměřené vzdálenosti stupnice na lihoměru do programu v PLC, a poté systém pomocí metody nejmenších čtverců vypočítá parametry polynomu, kterým se závislost aproximuje.

Dále je nutné zjistit vzdálenost snímače od lihoměru. To bylo vymyšleno následujícím způsobem. Nejprve uživatel vloží lihoměr do epruvety, která je zaplněna vodou. Tím zajistíme definovanou hodnotu koncentrace alkoholu, tedy 0 %. Systém zjistí detekovanou vzdálenost a uloží tuto vzdálenost jako vzdálenostní posun od vypočítané závislosti. Nyní se ale musíme vrátit k problému vlivu hmotnosti odrazné plochy na lihoměr. Vlivem přidané hmotnosti k lihoměru se naruší rovnováha sil, a lihoměr se tímto vlivem potopí více než je jeho správná poloha. Jelikož je ale působící přidaná síla konstantní, je i vzdálenost, o kterou se lihoměr navíc potopí, konstantní. Pokud tedy známe koncentraci alkoholu, což je v případě ponoření lihoměru do vody 0 %, jsme tedy zároveň zjistit i chybu, kterou nám přidaná hmotnost zanáší do měření. Systém tedy vyhodnocuje správné hodnoty koncentrace i při zatížení lihoměru odraznou plochou. Je ale velice důležité si uvědomit, že hodnoty koncentrace alkoholu, které vykazuje systém, se neshodují s hodnotou, kterou můžeme odečítat na lihoměru. Správná je v tomto

případě hodnota ze systému, proto by obsluha na hodnotu vykazující stupnice lihoměru neměla brát zřetel.

2.4.1 Korekce teplotní závislosti

V kapitole 1.5.2 bylo zmíněno, že měření koncentrace alkoholu destilátu pomocí lihoměru je značně teplotně závislé. Dále bylo zmíněno, že je tato závislost nelineární a je vyjádřena pomocí tabulek. Pro informaci uvádím, že lihoměry jsou běžně definovány pro měření při 20 °C. Z tabulek je tedy vhodné nečíst přímo hodnoty správných koncentrací při dané teplotě, ale pouze vypočítat korekci, kterou je nutné přičíst k měřené hodnotě koncentrace. Pro naše účely by bylo vhodné tyto korekce převést do podoby rovnic vyjadřujících jejich závislost. Tento úkol je ovšem složitější, než by se na první pohled mohlo zdát. Pro ukázkou můžeme vidět graf, kde jsou znázorněny hodnoty korekcí závislých na teplotě pro různé hodnoty naměřených koncentrací.



Obrázek 2.21: Graf závislostí korekcí na koncentraci alkoholu

Jelikož měření koncentrace alkoholu považujeme pouze za orientační, můžeme si tyto závislosti zjednodušit, a to tak, že grafy proložíme přímkou. Pro každou v grafu definovanou hodnotu měřené koncentrace si tedy můžeme sestavit následující rovnici přímky:

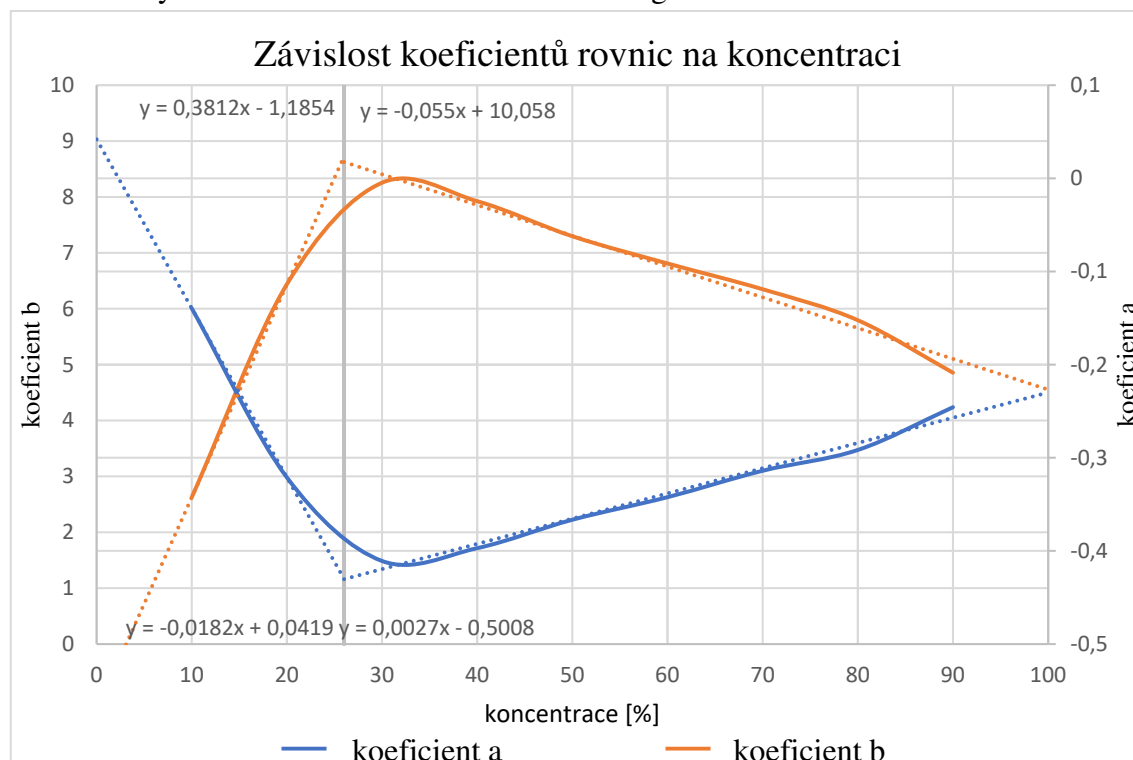
$$k = at + b, \quad (2.6)$$

kde k je hodnota korekce a t je teplota. Z této rovnice nás bude zajímat změna koeficientů a a b pro jednotlivé měřené koncentrace. To uvádí následující tabulka.

Tabulka 4: Závislost koeficientů rovnice na koncentraci alkoholu

koncentrace alk. [% obj.]	koeficient a	koeficient b
10	-0,1396	2,6268
20	-0,3211	6,439
30	-0,4108	8,2563
40	-0,397	7,9246
50	-0,3665	7,2971
60	-0,3423	6,8105
70	-0,3139	6,3489
80	-0,2916	5,7945
90	-0,2457	4,8558

Můžeme tedy definovat závislost mezi hodnotami koeficientů a měřenou koncentrací alkoholu. Tyto závislosti můžeme zaznamenat do grafu.



Obrázek 2.22: Graf závislosti koeficientů rovnic na koncentraci alkoholu

Vidíme, že tyto závislosti jsou značně nelineární a chovají se nevyzpytatelně. Jak ale již bylo zmíněno, měření je pouze orientační, a proto si závislosti zjednodušíme tím, že je nahradíme přímkou. Zde je ale nutné brát na zřetel hranici, kdy jsou závislosti rostoucí a kdy klesající. Tento předěl nastává při hodnotě koncentrace asi 26 % (resp. je zde maximální hodnota odchylky od lineárních aproximací). Proto výsledné rovnice definujeme pro dva různé intervaly. Rovnice teplotní závislosti tedy bude mít tvar

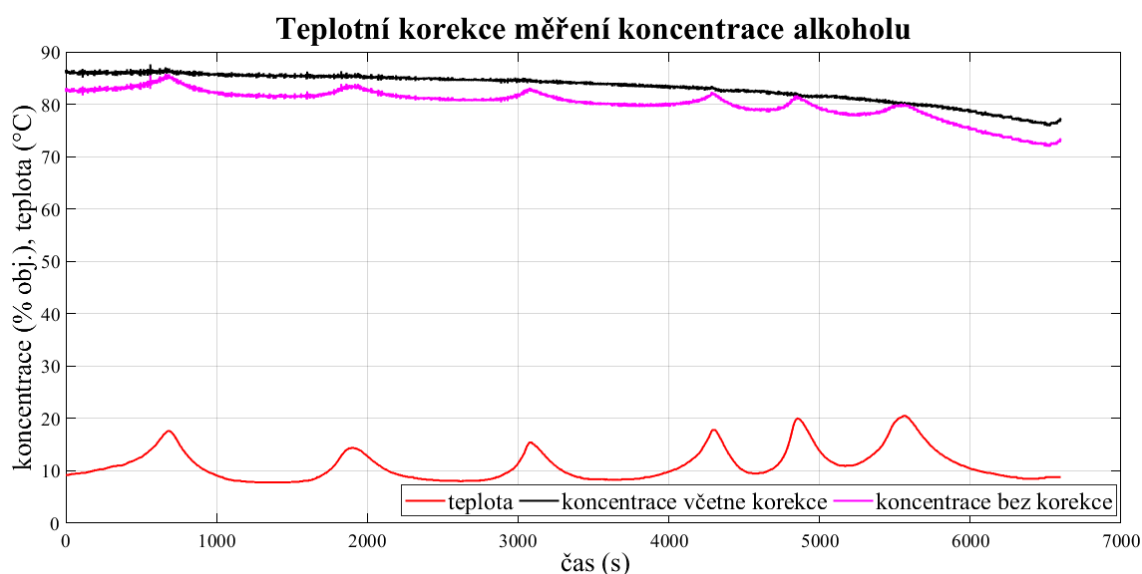
$$k = (c\sigma + d)t + (e\sigma + f), \quad (2.7)$$

kde c , d , e a f jsou koeficienty lineárních aproximací závislostí koeficientů korekční rovnice na měřené koncentraci a σ je objemová koncentrace alkoholu. Vzniknou tedy dvě výsledné rovnice pro dva rozsahy měřených koncentrací:

$$k = (-0,0182\sigma + 0,0419)t + (0,3812\sigma - 1,1854) \quad 0 \leq \sigma \leq 26, \quad (2.8)$$

$$k = (0,0027\sigma - 0,5008)t + (-0,055\sigma + 10,058) \quad 26 > \sigma \geq 100. \quad (2.9)$$

Výsledek aproximace teplotní závislosti můžeme pozorovat na následujícím grafu, kde je srovnání měření koncentrace alkoholu bez teplotní korekce a s teplotní korekcí. Pro názornost je zároveň znázorněna měřená teplota výstupního destilátu.



Obrázek 2.23: Graf teplotní korekce měření koncentrace alkoholu

Na grafu je vidět, jak měření bez teplotní korekce kolísá podle změn teploty. Zároveň orientačně vidíme správnost korekcí, jelikož při teplotě pod 20 °C je měřená koncentrace nižší než skutečná koncentrace, a při přiblížení k teplotě 20 °C se hodnoty měřené a korigované koncentrace přibližují.

Je zřejmé, že aproximace alkoholometrických tabulek pomocí těchto rovnic zanáší do měření určitou chybovost, ale je nutné si uvědomit, že toto měření je pouze orientační. Navíc vznikají při měření další chyby. Lihoměr se v epruvetě pohybuje, což vede k oscilaci měřené hodnoty. Dále je také nezanedbatelný způsob vtoku destilátu do epruvety, kdy se skutečná koncentrace alkoholu ve výstupním destilátu bude objevovat se zpožděním. Ovšem tyto nedokonalosti vyvažuje možnost měření lihovitosti v reálném čase, možnost tyto data převést do elektronické podoby, vhodně je zobrazit a dále podle těchto dat řídit destilační proces.

2.5 Program PLC

Jádrem celého projektu je bezesporu program běžící v PLC. Ten bude zajišťovat veškerou obsluhu kolony, automatické změny procesů, regulaci teplot a další součásti procesu destilace.

2.5.1 Struktura programu

Program pro destilační proces byl rozdělen do několika bloků, z nichž každý zastává určitou činnost. Tyto bloky jsou navzájem provázány dle potřeby. Data pro program jsou zapouzdřena do jedné struktury, která v sobě obsahuje další struktury pro jednotlivé bloky, které obsahují potřebné proměnné.

Nejprve byly vytvořeny funkční bloky ovládající jednotlivé prvky kolony. Pro topné spirály kotle byl vytvořen funkční blok *HeatingCoils_FC*, kde v závislosti na zadaném procentuálním výkonu funkce spíná jednotlivé spirály (tzn. spíná digitální výstupy) tak, aby byl výkon co nejlépe nastaven. Zároveň obsahuje ochranu proti příliš rychlému přepínání relé, kdy časovač umožní pouze jednu změnu výkonu za dvě sekundy. Umožňuje automatické i manuální řízení.

Proporcionální ventily řídící chlazení obsluhuje funkční blok *ValveAO_FC*. Ten otvírá ventil v závislosti na daném požadavku, a také snímá aktuální polohu ventilu a předává ji zpět. Umožňuje automatické i manuální řízení. Jelikož PLC při čtení a zapisování analogových hodnot pracuje s hodnotami danými převodníkem, je nutné vždy přepočíst hodnoty převodníků na reálné hodnoty. Pro čtení analogových hodnot slouží funkce *AnalogScaling_FC*, která přepočte hodnoty z převodníku na reálné hodnoty. Naopak funkce *Real2Analog_FC* zase přepočítá reálné hodnoty na hodnoty převodníku, které mu následně předá. Proto je tyto dvě funkce třeba vždy zařazovat před analogové vstupy a výstupy. Zároveň je funkce *AnalogScaling_FC* zodpovědná za zobrazení správných hodnot teploty. Čidla jsou zapojena do měřicí karty, která přímo vrací snímanou teplotu, avšak opět v podobě dat z převodníku.

Dále je vytvořen funkční blok *ManualDO_FC*, který slouží pro spínání digitálních výstupů. V programu procesu je využíván pro spínání míchacího zařízení, dále může být využit pro ruční spínání čerpadla pro čištění kolony či pro zapínání osvětlení.

Jelikož je systém také vybaven sirénou pro signalizaci poruch a dalších informativních signálů, byl vytvořen funkční blok *Siren_FC*, který obsluhuje digitální výstup pro připojení sirény. Umožňuje vzhledem k danému příkazu buď vyslání krátkého informativního signálu, delšího signálu vyžadující určitou manuální akci, nebo varovného signálu při poruše.

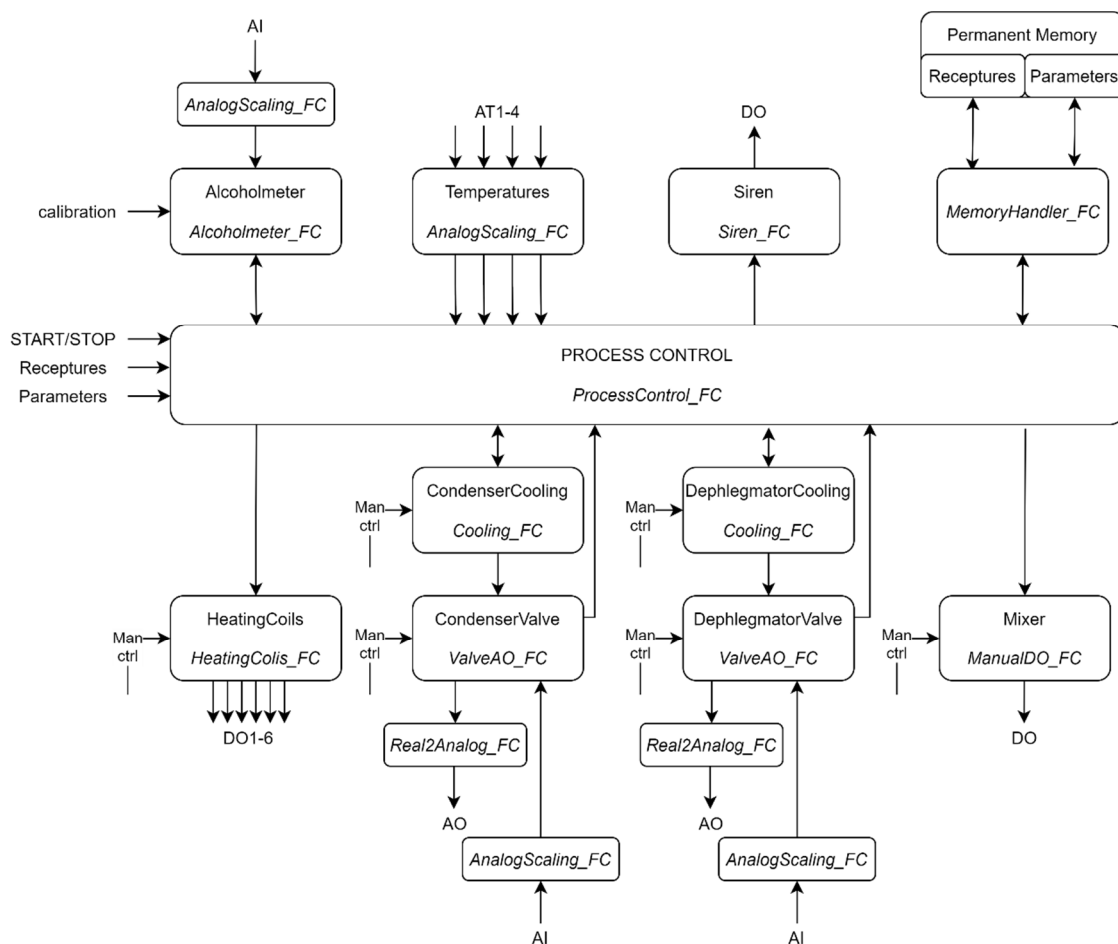
Pro ovládání regulace teploty chlazení deflegmátoru a chladiče byl vytvořen funkční blok *Cooling_FC*. V tomto bloku je zakomponován PID regulátor zodpovědný za udržování definované teploty. Blok umožňuje zadávání žádané teploty a obsahuje příkazy pro spuštění a zastavení regulace. Umožňuje automatický i manuální režim.

Pro měření hodnot koncentrace alkoholu je vytvořen funkční blok *Alcoholmeter_FC*. Ten provádí všechny úkony uvedené v kapitole 2.4, a dále předává pouze aktuální hodnotu měřené koncentrace. Potřebuje ovšem data o teplotě destilátu. Jeho vstupem je vzdálenost lihoměru od čidla. Zároveň funkční blok umožňuje zadávání hodnot pro kalibraci lihoměru

Celý program využívá lokální proměnné, jejichž hodnoty jsou po vypnutí ztraceny. Některé proměnlivé hodnoty je ale nutné držet v paměti pro další destilace. Jsou to především parametry kolony (například parametry regulátorů, limitní hodnoty atd.), které je možné uživatelsky měnit, a nelze je tedy zadat ručně do programu jako konstanty. Dále jsou to parametry destilačního profilu – receptury. Ty obsahují důležité informace o žádaném průběhu destilace. Tato data je potřebné ukládat do permanentní paměti PLC. Pro komunikaci mezi lokálními proměnnými a permanentní pamětí (permanentními globálními proměnnými) je vytvořen funkční blok *MemoryHandler_FC*. Ten při spuštění PLC načte všechny potřebné proměnné. Dále při změně parametrů uloží změny do globální paměti. Jsou zde implementovány všechny funkce sloužící uživateli ke změně parametrů kolony a destilačních profilů.

Celý proces destilace poté zastřešuje funkční blok *ProcessControl_FC*. Zde jsou implementovány všechny potřebné prvky pro celý proces. Tento funkční blok postupně spouští všechny potřebné fáze destilace pomocí ostatních nižších funkčních bloků, dále čte potřebná data ať už přímo nebo pomocí ostatních funkčních bloků. Dále čte stavy ostatních bloků na jejich základě řídí proces. Je to nejvyšší struktura v hierarchii programu. Její podrobná funkce je vysvětlena v kapitole 2.5.3.

Na následujícím schématu je znázorněno provázání jednotlivých bloků programu. Jsou uvedeny názvy výše popsaných bloků, a také název řídicí struktury dat, jež řídí daný blok. Jelikož byl celý řídicí systém tvořen v anglickém jazyce, jsou i jména bloků a struktur uvedena v angličtině.



Obrázek 2.24: Struktura programu

2.5.2 Destilační profily

Na požadavek investora je nutné mít možnost všechny parametry zodpovědné za průběh destilace a chování kolony zadávat a měnit pomocí ovládací platformy – vizualizace. Je to z toho důvodu, že nejsou jasně definované technologické požadavky, a také se můžou tyto požadavky měnit v závislosti na typu žádaného produktu. Aby obsluha nemusela při každé destilaci měnit tyto parametry, byly všechny tyto parametry „zapouzdřeny“ do tzv. destilačního profilu – de facto se jedná o recepturu daného produktu. Těchto profilů lze vytvořit více, a tak odpadne nutnost měnit parametry pro různé produkty.

V rámci programu lze vytvořit až 100 různých destilačních profilů. Uživatel je pomocí vizualizace může vytvářet, upravovat, kopírovat a smazat. Pokud jde o parametry, ty jsou sdruženy do skupin – oblastí destilačního procesu. Jedná se o tyto oblasti: topení (zahřívání), míchání, chlazení, deflegmace, ukončení destilace a ukončení procesu. Pro lepší zobrazení možností nastavení profilu je zde zobrazena část obrazovky vizualizace (která bude podrobně představena v dalších částech práce).

New profile		New profile		Save profile		Copy profile		Delete profile	
Name		New profile							
Heating			Dephlegmation			End of distillation			
Power reduction temp.	51 °C	Start	Dephl. (head) temperature	Control	Pot (heel) temperature				
Reduced power	35 %	Start - Pot (heel) temp.	0.0 °C	Pot (heel) temp.	96.0 °C				
Ending power	50 %	Start - Dephl. (head) temp.	85.0 °C	Alcohol (less than)	0.0 %				
Mixer			Start - Alcohol (less than)	0 %	Waiting time (min:sec)	02:00			
Control	Periodic	Control	Constant temp.	Stop process					
Period time (min:sec)	05:00	Constant temperature	84.0 °C	Control	Alcohol				
Running time (min:sec)	00:30	Heel - head difference temperature definition			Pot (heel) temp.	0.0 °C			
Condensation			Dephlegmation during end	<input checked="" type="checkbox"/>	Alcohol (less than)	5.0 %			
Condenser temperature	55.0 °C	Ending temperature	89.0 °C	Waiting time (min:sec)	06:00				

Obrázek 2.25: Obrazovka konfigurace destilačního profilu

V oblasti zahřívání (Heating) můžeme nastavit hodnotu teploty zvratu, při které dojde k snížení výkonu topných spirál, a také hodnotu toho sníženého výkonu. Dále můžeme nastavit výkon při konečné fázi destilace (kde je třeba pouze predestilovat zbytek směsi v kotli). Pro nastavení míchání (Mixer) je připraven výběr ovládání (manuálně, spouštět periodicky nebo spuštění po celou destilaci). Pokud si uživatel vybere periodické spouštění, může zadat periodu a čas běhu motoru. Další oblastí je chlazení chladiče (Condensation). Zde je pouze hodnota nastavení žádané teploty chladiče. Rozsáhlou oblastí je deflegmace (Dephlegmation). V této oblasti nejprve uživatel vybere podmínku spuštění destilace. Touto podmínku může být přesažení dané teploty nad kotlem (tzv. pata), přesažení teploty nad deflegmátorem (tzv. hlava) nebo poklesem lihovitosti. Dále je možnost zvolení režimu řízení teploty, a to buď zadat konstantní teplotu, nebo možnost ovládat teplotu pomocí rozdílu teploty pata – hlava (teploty páry nad kotlem a k ní definované teploty páry nad deflegmátorem). Pokud je zvolena druhá možnost, může uživatel definovat tabulku pro rozdíly teplot. Nakonec je zde možnost deflegmovat i při ukončování destilace. Pokud je možnost aktivní, uživatel zadá teplotu par nad deflegmátorem. Dále následuje oblast určení ukončení žádané destilace (End of distillation). To znamená, že se přestane jímát destilát jako požadovaný produkt, ale začne se jímát jako dokap (odpadní produkt). Uživatel si může vybrat z ukončovací podmínky (manuálně, teplota par nad kotlem nebo lihovitost) a zadat vybranou hodnotu. Dále má možnost nastavit čas oddálení ukončení, kdy po splnění podmínky ještě destilace v nezměněné podobě běží definovaný čas, a až po jeho uplynutí se projeví změny. Poslední oblastí je ukončení celého procesu (Stop process). Zde je opět na výběr podmínka ukončení (manuálně, teplota par nad kotlem a lihovitost), možnost zadat vybranou hodnotu, a opět zadat čas oddálení ukončení. Po jeho uplynutí dojde k ukončení

všech procesů (zahřívání a chlazení). Pomocí všech výše uvedených možností může uživatel nadefinovat libovolný průběh destilace pro různé produkty.

2.5.3 Běh programu

Po spuštění PLC je program ve stavu „Idle“. To znamená že jsou všechny funkce vypnuty a program čeká na jeho spuštění. Uživatel může v tomto stavu vybrat požadovaný destilační profil. Po spuštění programu se stav změní na „Running“. Nejprve je ale po obsluze požadována kontrola různých prvků kolony z hlediska bezpečnosti i správného manuálního nastavení pro správnou funkčnost. Teprve když obsluha potvrdí správnost nastavení, je spuštěno zahřívání směsi v kotli. Zároveň je vydán informační signál sirénou. Výkon topných spirál se nastaví na 100 % a v závislosti na nastavení spouštění míchání se buď spustí motor míchadla, nebo se spustí časovač pro určení jeho periodického spínání v určitých intervalech. Zároveň je spuštěna regulace chlazení chladiče, avšak jelikož je teplota chladiče rovna teplotě okolí, regulátor zatím není aktivní. Toto nastavení je pro případ, kdy by destilace nastala hned po předchozí destilaci a chladič by mohl být ohřátý.

Po dosažení teploty zvratu (tj. takové teploty par nad kotlem, která indikuje počátek varu) je výkon topných spirál zredukován na definovanou hodnotu. Začíná probíhat destilace. To se projeví zvyšováním všech teplot a začátkem regulace teploty chladiče. Důležitým bodem pro obsluhu je počátek průtoku destilace. To je indikováno pozvednutím lihoměru v epruvetě, která je na začátku prázdná. Toto pozvednutí je indikováno vzdálenostním snímačem a je vydán informativní signál. Poté začíná jímání úkapu. Ten se jímá do malé nádrže na koloně osazené čidlem hladiny. Pokud hladina v nádrži dosáhne požadované hodnoty, je vydán signál obsluze pro přepnutí ventilu do polohy jímání finálního destilátu. Ač je tato činnost zatím prováděna manuálně, program a celý systém počítá s dodáním elektricky ovládaného ventilu pro automatické přepínání mezi jímáním úkapu, jádra a dokapu.

Nyní začíná dlouhá fáze destilace, kdy program zajišťuje pouze definovaný výkon topných spirál a regulaci teploty chladiče. Tato fáze trvá cca 2-3 hodiny. Jak ale stoupá teplota vycházejících par z kotle, dojde poté ke splnění podmínky pro start deflegmace. Je spuštěna regulace teploty par nad deflegmátorem podle definovaných parametrů. Tím pokračuje fáze destilace finálního produktu.

Při pokračování procesu destilace se dostaneme do bodu, kdy již výstupní destilát není vyhovující jako finální produkt. Tento bod může být definovaný buď teplotou nebo lihovitostí. Pokud je tohoto bodu dosaženo a jsou splněny podmínky, je fáze destilace produktu zastavena. To ale neznamená ukončení procesu. Zbytek směsi v kotli je třeba predestilovat tak, aby bylo odpařeno co největší množství ethanolu. Nejprve se vydá signál obsluze pro přepnutí ventilu do polohy jímání dokapu. Opět je program připraven pro automatické přepnutí. Poté je v závislosti na nastavení profilu zvýšen výkon spirál a buď vypnuta nebo omezena deflegmace. Poté se pokračuje v destilaci. Zde je poté

patrné klesání lihovitosti destilátu a další nárůst teplot. Po dosažení minimální lihovitosti či definované teploty par nad kotlem (dle nastavení profilu) program ještě určitý čas vyčkává (opět dle nastavení), a poté se celý proces ukončí. To znamená vypnutí topení a zastavení chlazení (vypnutí regulace). Program se přepne do stavu „Done“. V tomto stavu pouze zajistí (pokud tak již není učiněno) vypnutí všech prvků a vydá signál obsluze, že je proces hotový. Zároveň může zobrazit uplynutý čas a odhad spotřebované energie. Poté se stav automaticky přepne opět na „Idle“.

2.5.4 Alarmy

Program musí nepřetržitě sledovat všechny snímané veličiny a stavy, a v případě jejich abnormálních hodnot informovat obsluhu a případně zajistit provedení různých činností tak, aby nedošlo k poškození kolony nebo aby se zamezilo znehodnocení produktu. Pro účely informování obsluhy je nainstalována siréna. Ta má pomocí programu definované tři úrovně alarmů. První, nejnižší úroveň vydá pouze krátký signál, který slouží pouze pro informování obsluhy, že došlo ke změně stavu programu či fáze destilace, ovšem program nevyžaduje žádný zásah a pokračuje dále. Druhou úrovní je potřeba obsluhy. Siréna vydá delší signál, který má za úkol přivolat obsluhu kolony, a provést manuální činnost, kterou systém nemůže vykonat automaticky. Jedná se především o přepnutí manuálních ventilů. Třetí, nejvyšší úroveň je signál chyby. Jedná se o nepřetržitý signál značící kritický stav, kdy program musí zasáhnout tak, aby nedošlo k poškození. Tím ale dojde k přerušení procesu destilace. Signál může obsluha vypnout, a poté přejít ke krokům zajišťujícím správnou funkčnost či manuálnímu dokončení destilace.

Jelikož je požadavkem mít systém co nejvíce variabilní, může obsluha programu sama aktivovat alarmy pro různé snímané veličiny, zadávat hodnoty spuštění alarmů a volit, jaká úroveň alarmu bude spuštěna. Dále také může zvolit akci, která se má provést po aktivaci alarmu, případně zastavit celý proces. Veličinami, díky kterým se můžou aktivovat alarmy, jsou teplota par nad kotlem, teplota par nad deflegmátorem, teplota chladiče, teplota destilátu, hladina kondenzátu ve vaporizační komoře a hladina v nádrži na úkap/dokap. Program dále počítá s instalací čidla pro snímání tlaku v kotli, s instalací průtokoměru vody, který by v případě otevřeného ventilu mohl indikovat přerušení dodávky vody a s instalací snímače uzavření hlavního ventilu vypouštění kotle.

Jak bylo zmíněno výše, program je vytvořen tak, aby obsluha sama mohla zadávat limitní hodnoty chybových stavů. Proto zde ani nemohou být uvedeny konkrétní hodnoty těchto kritických stavů, jelikož z hlediska technologických požadavků nebyly zadány.

2.6 Vizualizace

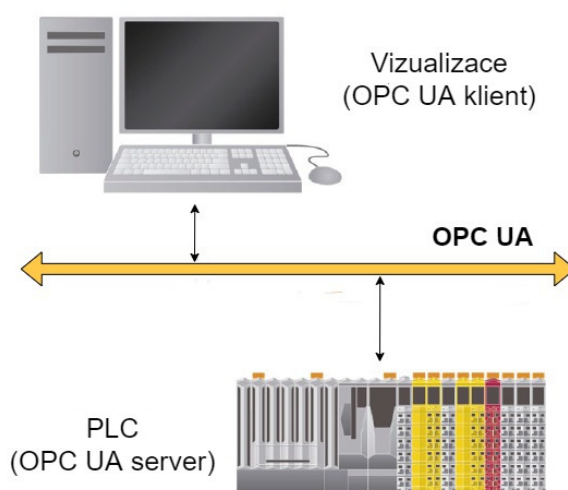
Důležitým prvkem diplomové práce je vizualizace destilačního procesu pomocí vhodné HMI aplikace (HMI – Human Machine Interface – rozhraní člověk-stroj). Zde je nutné umožnit jak vizuální zobrazení dat, průběhů veličin a indikaci probíhajících procesů, tak i možnost ovládání procesů a zadávání potřebných dat a parametrů. Jelikož bylo

rozhodnuto o tvorbě práce s využitím PLC od výrobce B&R s vývojovým prostředím Automation Studio, je vhodné se zmínit o platformách, které pro vizualizaci využívá. Čtenář by jistě mohl namítnout, že následně uvedené záležitosti by měly spadat do teoretické části práce, nicméně pro zachování jisté posloupnosti témat považuji za vhodné se o těchto prostředcích zmínit až zde.

2.6.1 OPC UA

OPC UA (Open Platform Communication Unified Arcitecture) je nezávislý komunikační protokol pro aplikace průmyslové automatizace. Umožňuje komunikaci mezi jednotlivými senzory a aktuátory s nadřazenými systémy nebo vzdálenými úložišti. OPC UA je mezinárodní standart který zajišťuje bezpečnou a spolehlivou výměnu informací pro průmyslovou komunikaci.

Pro systémy B&R je OPC UA využíván pro různé účely, jako například výměnu dat mezi procesory či propojení zařízení na sběrnici Fieldbus, avšak pro nás je důležité využití pro připojení HMI aplikací k PLC systémům, čehož využívá i systém mapp View.



Obrázek 2.26: Výměna dat mezi HMI a řídicím systémem [14]

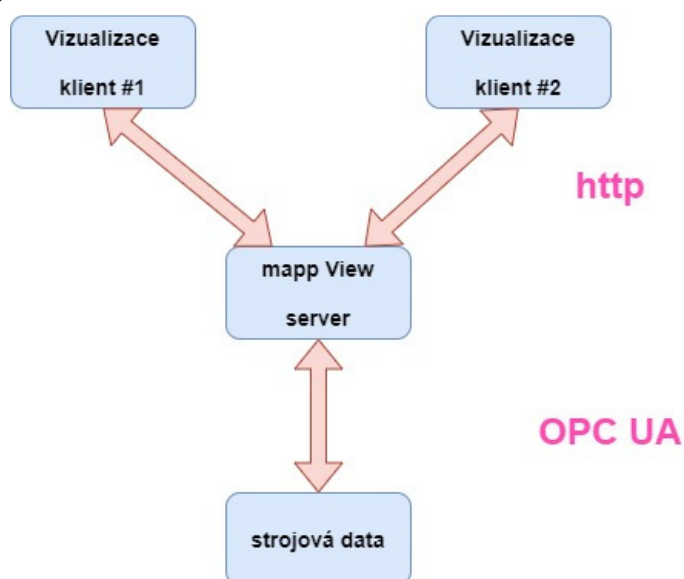
Pro příklad jako je na obrázku tedy znamená, že HMI aplikace jako OPC UA klient je propojena s PLC, které funguje jako OPC UA server, a čte nebo zapisuje data (OPC UA atributy) do adresního prostoru OPC UA. Tyto data jsou získávány z PLC přes OPC UA server.

HMI aplikace může rovněž předcházet zbytečnému vytížení sítě způsobeného nepřetržitě opakovaným vyčítáním dat. Požadavek na vyslání dat, které HMI aplikace potřebuje, je vyslán serveru společně s požadavkem na monitorování případných změn hodnot. Pouze pokud se hodnoty potřebných dat změní, jsou tyto data přeneseny.

2.6.2 mapp View

Systém mapp View je vývojové prostředí obsahující sadu nástrojů pro tvorbu HMI

aplikací vytvořený společností B&R, který využívá OPC UA pro komunikaci s PLC. Tento systém je integrovaný ve vývojovém prostředí Automation Studio a využívá se pro tvorbu vizualizací.



Obrázek 2.27: Funkce mapp View [15]

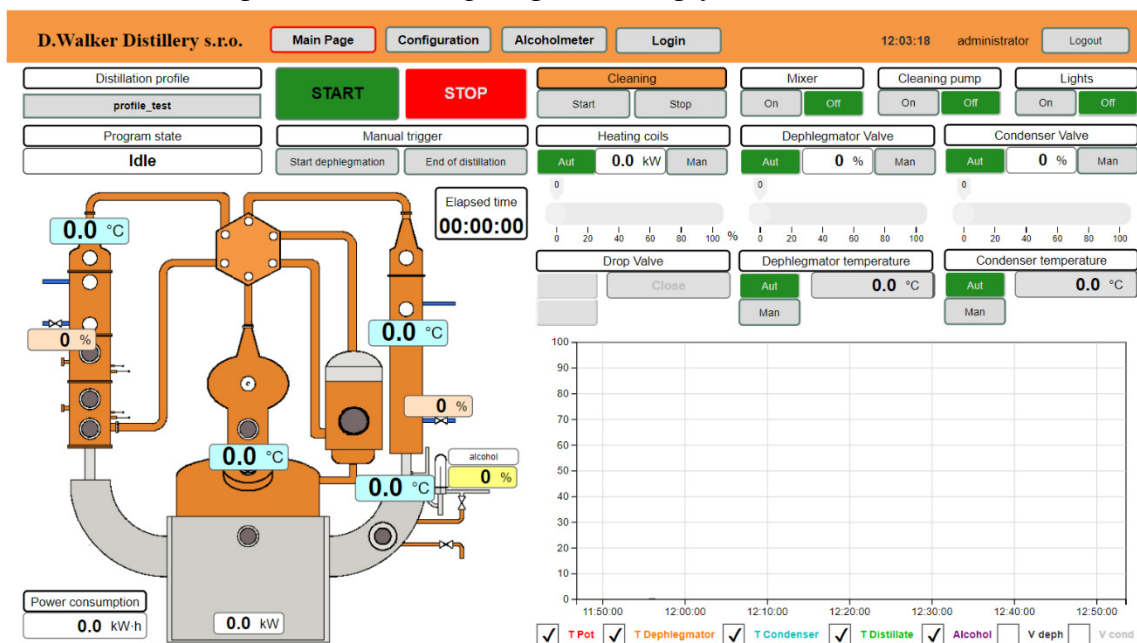
Systém mapp View dává možnosti pro vývoj HMI aplikací, a přestože je postaven na jazycích HTML5, CSS3 a JavaScript, programátor se těmito jazyky vůbec nemusí zabývat, jelikož jsou veškeré funkce zapouzdřeny v modulárních blocích (tzv. widgety). Ty lze jednoduše umisťovat do projektu a poté konfigurovat. Další modularita mapp View spočívá v tom, že obsah a dispozice jsou od sebe vzájemně odděleny, a tudíž mohou být upravovány zvlášť. To zkracuje dobu vývoje a umožňuje opakovatelné použití. Dále mapp View umožňuje různé úrovně přístupu k obsahu vizualizace, tedy například různé možnosti ovládání pro obsluhu, údržbu či vývojáře.

2.6.3 Návrh obrazovky HMI

Cílem celé vizualizace je srozumitelně a přehledně zobrazit aktuální data destilačního procesu, zprostředkovat ovládání, a zároveň umožnit konfiguraci procesu změnou všech dostupných parametrů. Proto byla výsledná HMI aplikace rozdělena do několika různých oken, kde v každém z nich může obsluha najít potřebné informace. Nad nimi je společné záhlaví, kde nalezneme možnost přepínat mezi jednotlivými obrazovkami, aktuální čas, aktuálně přihlášeného uživatele a možnost odhlášení uživatele. Je nutné upozornit, že po dohodě s investorem byla celá vizualizace tvořena v anglickém jazyce.

První obrazovkou je hlavní stránka (Main Page). Hlavním prvkem obrazovky je schéma destilační kolony, kde jsou zobrazována měřená data. Zobrazovače dat jsou vhodně umístěny do míst ve schématu, kde jsou data skutečně měřena, což umožňuje jejich snadnou identifikaci. Patří mezi ně teploty, otevření ventilů, lihovitost, aktuální výkon spirál nebo upozornění na maximální hladiny. Nad tímto schématem se nachází

hlavní ovládání, tedy výběr destilačního profilu, tlačítka START a STOP, ukazatel stavu programu a manuální spouštěče. Vedle schématu kolony je umístěn graf průběhu určitých měřených veličin. Uživatel může zobrazování jednotlivých veličin libovolně zapínat a vypínat. Zbytek stránky vyplňují ovladače všech prvků. Uživatel může (u většiny z nich) přepínat mezi automatickým a manuálním režimem. Při manuálním režimu je možné zadávat požadované hodnoty. Ovladač pro ventil úkapu je pouze přípravou (není aktivní). Mezi ovladači se nachází i spouštěč čistící fáze. Posledními prvky jsou orientační odhad spotřebované energie a počítadlo uplynutého času destilace.



Obrázek 2.28: Vizualizace – hlavní stránka

Druhou obrazovkou je stránka konfigurace (Configuration), kde je možné měnit všechny dostupné parametry destilačního procesu. Velkou část obrazovky zaplňuje úprava destilačních profilů. V horní části obrazovky je nejprve nutné vybrat destilační profil, který budeme upravovat. Zároveň zde jsou tlačítka umožňující založit nový profil, vytvořit kopii profilu, profil uložit, anebo profil smazat. Všechna dostupná data jsou sdružena do logických celků. Je zde možno upravovat parametry topení, míchání, chlazení kondenzátoru, chlazení deflegmátoru a parametry ukončení procesu. Parametry, které vzhledem k vybrané variantě ovládání nejsou potřebné, nejsou dostupné. Dále lze na této obrazovce měnit parametry společné pro všechny profily. Jedná se o parametry nastavení regulátorů a nastavení alarmů. Alarmy se nastavují v otevřeném dialogovém okně, kde je možné je vypínat a nastavovat jejich chování či následné akce.

D.Walker Distillery s.r.o. [Main Page](#) [Configuration](#) [Alcoholmeter](#) [Login](#) 12:05:01 administrator [Logout](#)

Distillation profile

[profile_test](#)
[New profile](#)
[Save profile](#)
[Copy profile](#)
[Delete profile](#)

Name

Heating

Power reduction temp. °C
Reduced power %
Ending power %

Dephlegmation

Start Control
Start - Pot (heel) temp. °C Pot (heel) temp. °C
Start - Dephl. (head) temp. °C Alcohol (less than) %
Start - Alcohol (less than) % Waiting time (min:sec)

Mixer

Control Control
Period time (min:sec) Constant temperature °C
Running time (min:sec) Heel - head difference temperature definition Pot (heel) temp. °C

Condensation

Condenser temperature °C Dephlegmation during end ☐ Alcohol (less than) %
Ending temperature °C Waiting time (min:sec)

End of distillation

Control

Stop process

Regulation

[Dephlegmator](#)
[Condenser](#)

Gain
Integration time
Derivative time
Filter time
[Help](#) [Save PID parameters](#)

Alarms

[Alarms configuration](#)

Obrázek 2.29: Vizualizace – stránka konfigurace

Další obrazovkou je stránka s nastavením měření obsahu alkoholu ve výstupním destilátu (Alcoholmeter). Zde je pouze nastavení pro výpočet parametrů měření lihovitosti nebo jejich úpravu. Uživatel zde může zadat nové vzdálenosti jednotlivých bodů na stupnici lihoměru, a tak umožnit měření s novým lihoměrem, nebo zpřesnit měření. Zároveň je možné zadat offset měřené hodnoty, což umožní zpřesnit měření na základě porovnávání dat s daty z jiného způsobu měření. Pro obsluhu je důležitým prvkem návod na kalibraci lihoměru doplněný o piktogramy, kde je znázorněn způsob měření vzdáleností na stupnici lihoměru.

D.Walker Distillery s.r.o. [Main Page](#) [Configuration](#) [Alcoholmeter](#) [Login](#) 11:59:43 administrator [Logout](#)

Alcoholmeter calibration

Alcohol [% obj.]	Distance [mm]
0	0.0
10	0.0
20	0.0
30	0.0
40	0.0
50	0.0
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.0

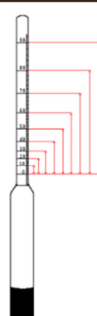
☐ Alcoholmeter to 100 %
[Calculate parameters](#)

Manual offsets

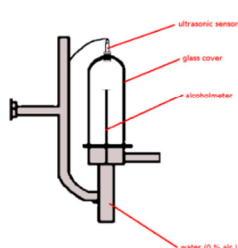
Alcohol offset Distance offset

[Set offsets](#)

Instructions



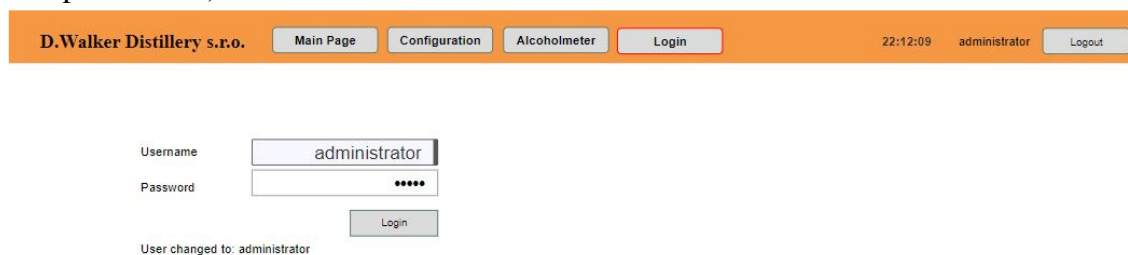
Step 1:
Measure distances between zero and values in table. Write distances to the table (in millimeters). In case with alcoholmeter to 100% check the box.



Step 2:
Place alcoholmeter to the epruvet filled with water (0 % alc.). Mount glass cover with ultrasonic sensor. Then click on 'Calculate parameters' button.

Obrázek 2.30: Vizualizace – stránka kalibrace lihoměru

Poslední obrazovkou je přihlašovací stránka (Login). Zde je možné se přihlásit do aplikace pomocí uživatelského jména a hesla. To umožní práci s vizualizací (více v kapitole 2.6.4).



Obrázek 2.31: Vizualizace – stránka přihlášení

2.6.4 Zabezpečení

Jelikož ovládání celého procesu bude probíhat pomocí vizualizace, je nutné zajistit určitá bezpečnostní opatření, aby se zamezilo cizímu přístupu. Jelikož je vizualizace webová aplikace, nabízí se jako základní zabezpečení provozování pouze na lokální síti s příslušným firewallem. Tím bychom zamezili přístupu k síti zvenčí.

Další zabezpečení nabízí přímo mapp View, a to za pomoci uživatelských přístupů (user role system). Jedná se o způsob, kdy se každé skupině uživatelů přiřadí určitá práva přístupu. Rozpoznání jednotlivých uživatelů probíhá pomocí jejich přihlášení do prostředí mapp View, kdy má každý uživatel přiřazené uživatelské jméno a příslušné heslo. Jednotlivým uživatelům se poté můžou přiřazovat určitá práva přístupu. Tím je možné jak určit příslušné ovládací a signalizační prvky vizualizace těmto uživatelům, tak i úplně zamezit přístupu k prvkům vizualizace. Pro tento systém jsou vhodné tyto uživatelské role: návštěvník (visitor), obsluha (service) a správce (administrator).

První role Visitor slouží pro ukázkou systému třetím osobám. Tento uživatel by po přihlášení do systému mohl pozorovat děje na koloně, hodnoty veličin a jejich průběhy. V rámci vytvořené vizualizace my se jednalo o hlavní stránku. Zde by uživatel mohl pozorovat všechny údaje, ovšem vizualizace by neumožňovala zásah do procesu. Všechny ovládací prvky obrazovky by pro tohoto uživatele byly neaktivní. Tudíž nehrozí riziko neodborného zásahu, ale uživatel může tyto zásahy pozorovat. Ostatní stránky vizualizace by uživateli nebyly přístupné.

Druhá role Service je určena pro obsluhu kolony, ovšem pouze pomocí předem nastavených profilů či manuálně. Tento uživatel by nemohl měnit parametry profilů, a tím znehodnotit jejich nastavení či změnit podobu výsledného produktu. Jedná se například o případy, kdy je nutné svěřit obsluhu do rukou seznámené osoby, avšak podle již daných parametrů. Ve vizualizaci by proto tento uživatel měl plný přístup ke všem ovládacím

prvkům na hlavní obrazovce vizualizace, a rovněž také k obrazovce měření lihu (pro případ výměny lihoměru). Obrazovka konfigurace by uživateli nebyla přístupná.

Třetí rolí je Administrator. Tato role je určena pro správce systému a dává uživateli přístup ke všem prvkům vizualizace, takže kromě obsluhy může uživatel měnit, přidávat a odstraňovat profily, měnit parametry kolony a definice alarmů.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je vyústěním projektu automatizace destilační kolony. Cílem práce bylo navrhnout řídicí systém kolony, který zajistí její částečnou automatizaci a umožní opakovatelnost procesu destilace.

V teoretické části byl čtenář seznámen se základními principy a postupy, které bylo nutné znát pro pochopení účelu práce. Zde byla vysvětlena problematika výroby destilátů, představena struktura destilačního zařízení a způsoby měření lihovitosti destilátů. Tyto poznatky byly využity pro realizaci práce.

V praktické části nejdříve proběhlo seznámení s konkrétní destilační kolonou. Poté bylo popsán použitý hardware. Celý projekt byl tvořen pomocí PLC od výrobce B&R Automation. Na něm rovněž běží vytvořený software a vizualizace. Důležitou částí práce byla regulace teploty deflegmátoru a chladiče. Regulace je zajištěna pomocí PID regulátorů. Výsledná regulace teploty deflegmátoru kolísá v mezích $-0,2$ až $+0,5$ °C od zadané teploty, což vyhovuje technologickým požadavkům. Regulace teploty chladiče již kolísá více, a to v mezích -5 až $+2,5$ do zadané teploty, avšak vzhledem k důvodům uvedených v práci je to z technologického hlediska vyhovující. Dalším provedeným prvkem práce bylo měření lihovitosti výsledného destilátu. Zde bylo popsáno vlastní řešení pomocí snímání vzdálenosti lihoměru a také řešení korekce teplotní závislosti měření. Pro celé ovládání kolony byl vytvořen řídicí software. Ten ovládá všechny automaticky řízené procesy destilace a umožňuje manuální řízení elektricky ovládaných prvků kolony. Software byl vytvářen tak, aby umožňoval co největší variabilitu, a obsluha mohla v co největší míře zajistit ovládání kolony dle svých požadavků. To je umožněno za pomoci vytvořené vizualizace. Ta byla jedním z nejnáročnějších prvků práce, jelikož muselo být umožněno zobrazování požadovaných dat, manuální ovládání všech prvků kolony, automatické spouštění procesu dle předem nastavených destilačních profilů, konfigurace těchto profilů a dalších parametrů a kalibrace měření lihovitosti za podmínek zajištění bezpečnosti a zabránění ovládání kolony neoprávněnými osobami.

Celkový přínos práce pro výrobu tkví v možnosti jasně a opakovatelně nastavit destilační proces a zobrazovat data z destilace, dle kterých poté lze upravit specifika procesu. Pro obsluhu rovněž znamená úsporu času, jelikož již nemusí nepřetržitě kontrolovat a ovládat celý proces. Zároveň byla zjištěna úspora chladicí vody, která je použita na chlazení kolony, a to až o cca 40 %.

Je důležité zmínit, že celý projekt automatizace destilační kolony nelze v této fázi považovat za dokončený. Jednak je zde stále možnost zlepšení regulace chlazení a tím ještě zvýšit úsporu chladicí vody, jednak se počítá se zavedením dalších prvků automatizace, a to s automaticky ovládaným ventilem pro přepínání mezi sběrem destilátu a úkapem/dokapem, čidlem průtoku destilátu a průtoku vody, tlakovým čidlem pro zajištění bezpečnosti, dalšími teplotními senzory atd. Zároveň se stále nacházejí další možnosti řízení, se kterými jsou spojeny další úpravy řídicího systému.

LITERATURA

- [1] PISCHL, Josef. *Vyrábíme ušlechtilé destiláty*. Praha: I. Železný, 1997. Knížky dostupné každému. ISBN 80-237-3441-5.
- [2] DYR, Josef a Jan E. DYR. *Výroba slivovice a jiných pálenek*. 5. vydání. Praha: Maxdorf, 2020. ISBN 978-80-7345-657-3.
- [3] GÖLLES, Alois. *Ušlechtilé destiláty: praktická kniha o pálení*. Praha: Ivo Železný, 2001. Knížky dostupné každému. ISBN 80-237-3642-6.
- [4] Engineering ToolBox, *Ethanol – Density and Specific Weight* [online]. 2018 [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-ethyl-alcohol-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2028.html
- [5] *Úřední alkoholometrické tabulky, Část 2*. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR, 1995.
- [6] *Český lékopis: Pharmacopoea Bohemica*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0500-7.
- [7] *Refraktometrie – využití refraktometru*. Refraktometr.cz [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.refraktometr.cz/vyuziti-refraktometru>
- [8] BALÍK, Josef. *Ovocné destiláty* [online]. 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/stranka.php?prez=318
- [9] CÍDLOVÁ, Hana. *Destilace* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech-old/soubory/operace/separacni_metody/destilace.pdf
- [10] PETŘIVALSÝ, Marek. *Výroba lihu, lihovin a biomasy* [online]. Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/biochemie/Dokumenty/Materialy_k_vyuce/KBC-BTC_Prezentace_02-03_bioetanol_a_lihoviny.pdf
- [11] CHLAD, Petr. *Řídicí systém pro laboratorní model destilační kolony*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2012. 98 s. Vedoucí práce byl Ing. Radek Štohl, Ph.D.
- [12] DIFFORD, Simon. *Production of Gin*. Difford's Guide [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.diffordsguide.com/g/1108/gin>
- [13] POSPÍŠILOVÁ, Klára. *Jak vzniká gin aneb trochu té moderní alchymie*. GIN your life [online]. 2018 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.ginyourlife.cz/blog/jak-vznika-gin-aneb-trochu-te-moderni-alchymie-b13.html>
- [14] *OPC UA basics and use*. B&R [online]. 2019, 60 s [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://download.br-automation.com/BRP44400000000000000626015/TM980TRE.452-ENG_V1011_OPC%20UA%20Basics%20and%20use.pdf?px-hash=407762fc251cf23e5ed05679094a9faa&px-time=1608047089

- [15] *Working with mapp View*. B&R [online]. 2020, 88 s [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://download.br-automation.com/BRP44400000000000000643538/TM611TRE.471-ENG_Working%20with%20mapp%20View5.10_V2201.pdf?px-hash=73f295d7d2f7307d58c856ff64d2a6d7&px-time=1608045774
- [16] *Creating efficient mapp View HMI applications*. B&R [online]. 2020, 52 s [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://download.br-automation.com/BRP44400000000000000644516/TM671TRE.471-ENG_Creating%20powerful%20mapp%20View%20visualizations_mv_V5.10.pdf?px-hash=22cf40eb964f8c63b23c4fb4dfef9189&px-time=1620677935

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - OBSAH CD	69
PŘÍLOHA B - NÁVOD K OBSLUZE	70

Příloha A - Obsah CD

Na přiloženém CD naleznete:

- Diplomovou práci ve formátu PDF
- Záloha řídicího SW – projekt Automation Studio
- Návod k obsluze – samostatný PDF soubor
- Katalogové listy použitých zařízení

Příloha B - Návod k obsluze

1 Obecné informace

Tento dokument slouží jako návod k obsluze řídicího systému destilační kolony pomocí vizualizace. Pro připojení k vizualizaci je nutné zařízení schopné připojení k síti a webovým prohlížečem (PC, notebook, tablet, smartphone nebo chytrá televize). Po připojení do stejné sítě s PLC je nutné zadat do prohlížeče IP adresu PLC, a zadat port 81. Příklad: pokud je IP adresa 192.168.0.1, potom do vyhledávače prohlížeče zadáme adresu 192.168.0.1:81. Po načtení adresy se již nacházíme ve vizualizaci.

2 Přihlášení

Po načtení vizualizace se objeví stránka s přihlášením.



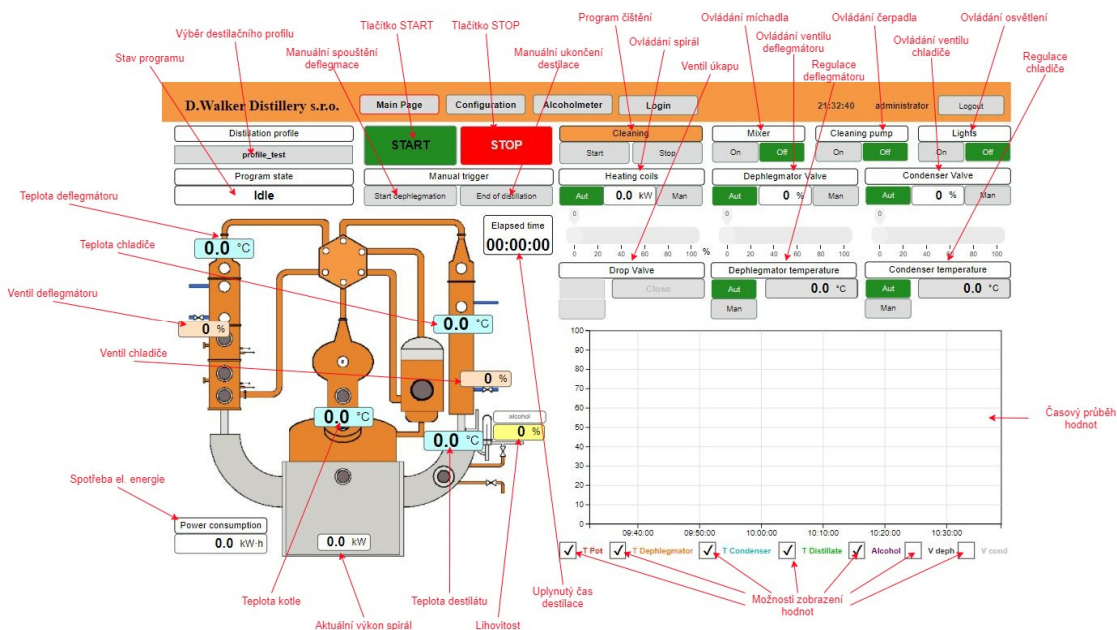
Obr. 1 – Přihlášení

Bez přihlášení není možné zobrazit ostatní stránky, a v záhlaví se objeví pouze stránka s přihlášením (Login). V závislosti na úrovni přístupu se zpřístupní jednotlivé stránky a jejich komponenty. Přihlásit se lze jednoduše vyplněním uživatelského jména (Username) a hesla (Password) a stiskem tlačítka Login. Odhlášení je možné pomocí tlačítka Logout, které se nachází v záhlaví. Další kapitoly budou předpokládat úroveň přihlášení „Administrator“, které zpřístupní všechny prvky vizualizace.

3 Popis obrazovek

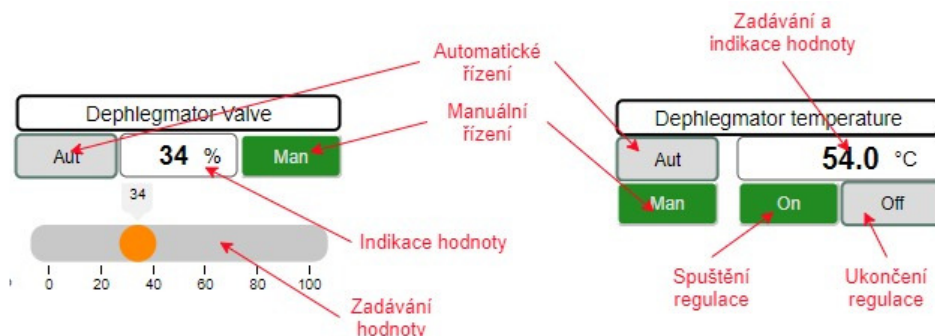
3.1 Hlavní stránka (Main Page)

Na hlavní stránce se nachází indikační prvky, možnosti manuálního ovládání a spouštění celého procesu. Popis všech prvků vidíme na následujícím obrázku:



Obr. 2 – Popis prvků hlavní stránky

Některé prvky odlišují automatické a manuální řízení. Jsou to prvky ovládání spirál a ventilů, které mají stejné ovládací rozhraní, a ovládání regulací, jež mají jiné ovládací rozhraní. Popis funkcí nabízí následující obrázek:



Obr. 3 – Popis ovládacích prvků

Ostatní prvky (míchání, čerpadlo a osvětlení) je možné pouze zapnout (On) nebo vypnout (Off).

3.2 Stránka konfigurace (Configuration)

Na stránce konfigurace je možné měnit všechny dostupné parametry kolony. Je zde ohraničený celek, ve kterém se nastavují parametry destilačních profilů, a také parametry regulace a nastavení alarmů. Prvky pro práci s profily jsou popsány v následujícím obrázku, další parametr budou popsány dále v dokumentu.

D.Walker Distillery s.r.o. Main Page Configuration Alcoholmeter Login 22:11:03 administrator Logout

Distillation profile

profile_test New profile Save profile Copy profile Delete profile

Name

Heating

Power reduction temp. Start Control

Reduced power Start - Pot (heel) temp. Pot (heel) temp.

Ending power Start - Dephl. (head) temp. Alcohol (less than)

Mixer

Control Control **Stop process**

Period time (min:sec) Constant temperature Control

Running time (min:sec) Heel - head difference temperature definition

Condensation

Condenser temperature Dephlegmation during end ☒ Alcohol (less than)

Ending temperature Waiting time (min:sec)

Regulation

Dephlegmator Condenser

Gain Integration time Derivative time Filter time

Help Save PID parameters

Alarms

Alarms configuration

Obr. 4 – Stránka konfigurace

3.3 Stránka kalibrace lihoměru (Alcoholmeter)

Stránka Alcoholmeter obsahuje možnosti měření lihovitosti. Zde je možné zkalibrovat nový lihoměr, nebo vylepšit nastavení současného. Na stránce je zobrazen stručný návod na kalibraci lihoměru. Postup kalibrace bude popsán dále.

D.Walker Distillery s.r.o. Main Page Configuration Alcoholmeter Login 11:19:46 administrator Logout

Alcoholmeter calibration

Alcohol [% obj.]	Distance [mm]
0	0.0
10	0.0
20	0.0
30	0.0
40	0.0
50	0.0
60	0.0
70	0.0
80	0.0
90	0.0

☐ Alcoholmeter to 100 %

Calculate parameters

Manual offsets

Alcohol offset Distance offset

Set offsets

Instructions

Step 1:
Measure distances between zero and values in table. Write distances to the table (in millimeters). In case with alcoholmeter to 100% check the box.

Step 2:
Place alcoholmeter to the epruvet filled with water (0 % alc.). Mount glass cover with ultrasonic sensor. Then click on 'Calculate parameters' button.

Obr. 5 – Stránka kalibrace lihoměru

4 Spuštění procesu destilace

Spuštění procesu destilace se provádí na hlavní stránce (Main Page). Nejdříve je nutné vybrat požadovaný destilační profil, a poté je možné spustit destilaci tlačítkem START. Po stisku tlačítka je ještě nutné akci potvrdit. Poté již nastává vlastní proces podle požadavků definovaných v profilu. Spuštění procesu je indikováno stavem Running. Dále

se začne odpočítávat čas destilace. Zastavení procesu se dle definovaných podmínek provede automaticky, pro ruční ukončení slouží tlačítko STOP.

5 Konfigurace destilačních profilů a nastavení parametrů

Zadávání všech parametrů, které může uživatel konfigurovat, se nacházejí na stránce Configuration. Zde bude uveden popis funkce jednotlivých parametrů, které se nacházejí na této stránce.

Popis parametrů:

- Heating – parametry topení
 - Power reduction temp. – tzv. teplota zvratu, při které dojde k omezení výkonu topných spirál
 - Reduced power – hodnota omezení výkonu spirál
 - Ending power – výkon spirál při konečné fázi destilace
- Mixer – parametry míchadla
 - Control – výběr možnosti ovládání
 - Manually – manuální spouštění
 - Periodic – spouštění po určitých intervalech na určitý čas
 - All time – míchadlo spuštěno stále
 - Period time – čas intervalu pro spouštění míchadla
 - Running time – čas běhu míchadla
- Condensation – parametry chlazení kondenzátoru
 - Condenser temperature – nastavení teploty chladiče
- Dephlegmation – nastavení parametrů deflegmace
 - Start – výběr podmínky spuštění deflegmace
 - Pot (heel) temp. – teplota nad kotlem (pata)
 - Dephl. (head) temp. – teplota nad deflegmátorem (hlava)
 - Alcohol value – hodnota lihovitosti
 - Start - Pot temp. – práh pro spuštění - teplota nad kotlem
 - Start - Dephl temp. – práh pro spuštění - teplota nad deflegmátorem
 - Start – Alcohol (less than) – práh pro spuštění - lihovitost
 - Control – výběr možnosti regulace
 - Constant temp. – regulace na konstantní teplotu
 - Heel-head difference – regulace na teplotu určenou teplotou nad kotlem (pata)
 - Constant temperature – nastavení konstantní teploty deflegmátoru
 - Heel-head difference temperature definition – po stisku tlačítka se zobrazí tabulka, kde lze zadávat příslušné teploty deflegmátoru k teplotám kotle

Heel - head difference temperature definition															
Pot (heel) temperature	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Dephl. (head) temperature	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Obr. 6 – Definice teplot deflegmátoru (řízení pata – hlava)

- Dephlegmation during end – zvolení možnosti deflegmace při konečné fázi destilace
- Ending temperature – teplota deflegmátoru při konečné fázi destilace
- End of distillation – nastavení parametrů ukončení žádané destilace a přechod do konečné fáze
 - Control – výběr možnosti ukončení
 - Manually – ruční ukončení
 - Pot (heel) temperature – ukončení teplotou kotle
 - Alcohol – ukončení při poklesu lihovitosti
 - Pot (heel) temp – prahová hodnota teploty kotle
 - Alcohol (less than) – prahová hodnota lihovitosti
 - Waiting time – čas, jenž se začne odpočítávat při dosažení podmínky, po kterém se ukončí žádaná destilace (zpoždění ukončení)
- Stop process – nastavení parametrů ukončení procesu
 - Control – výběr možnosti ukončení
 - Manually – ruční ukončení
 - Pot (heel) temperature – ukončení teplotou kotle
 - Alcohol – ukončení při poklesu lihovitosti
 - Pot (heel) temp – prahová hodnota teploty kotle
 - Alcohol (less than) – prahová hodnota lihovitosti
 - Waiting time – čas, jenž se začne odpočítávat při dosažení podmínky, po kterém se ukončí proces (zpoždění ukončení)
- Regulation – parametry regulace (tyto parametry ovlivňují podobu regulace, a proto by je měla měnit pouze pověřená osoba, která zná důsledky změn parametrů)
- Alarms – nastavení alarmů
 - Alarms configuration – po stisku tlačítka se objeví okno, ve kterém je možné aktivovat jednotlivé alarmy (Enable), nastavit prahy spouštění (Threshold), nastavit čas spuštění alarmu (Alarm trigger), zvolit akci (Action) a zvolit, zda má být ukončen proces (Stop process)

	Enable	Threshold	Alarm trigger	Action
Pot temperature	<input checked="" type="checkbox"/>	99.0 °C	Immediately	None
Dephlegmator temperature	<input type="checkbox"/>			
Condenser temperature	<input checked="" type="checkbox"/>	78.0 °C	Immediately	Condenser cool
Distillate temperature	<input type="checkbox"/>			
Vaporizer max level	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0	Wait for service	None
Drop max level	<input type="checkbox"/>			
Main drain valve	<input type="checkbox"/>			
Pot pressure	<input type="checkbox"/>			

Save alarms parameters

Obr. 7 – Konfigurace alarmů

Na celé stránce jsou aktivovány vždy jen ty parametry, které je nutné vzhledem k nastavení zadat. Ostatní parametry jsou deaktivovány (šedá barva, nelze zadávat).

6 Kalibrace lihoměru

Postup kalibrace je následující: Nejdříve je nutné ručně změřit jednotlivé vzdálenosti hodnot na stupnici lihoměru, a to vždy od hodnoty 0. Tyto vzdálenosti zapíšeme do tabulky, vždy vzdálenost (Distance) k příslušné hodnotě lihovitosti (Alcohol). Hodnota pro lihovitost 0 % tedy zůstane 0 mm. Pokud disponujeme lihoměrem se stupnicí do 100 %, zaškrtneme příslušné políčko (Alcoholmeter to 100 %). Po naměření vzdáleností na lihoměr připevníme odraznou plochu, a umístíme lihoměr do epruvety, která musí být naplněna vodou (pro získání 0 % lihovitosti). Poté epruvetu zakryjeme skleněným krytem s ultrazvukovým senzorem. Pokud jsme dokončili všechny předchozí kroky, stiskneme tlačítko pro výpočet parametrů (Calculate parameters). Poté jsou uvnitř programu provedeny příslušné výpočty a systém začne měřit lihovitost. Na stránce je rovněž možné zadávat posunutí hodnot, a to jak posun hodnoty lihovitosti (Alcohol offset), tak vzdálenostní posun (Distance offset). Po zadání hodnot se výsledné parametry přepočítají po stisku tlačítka Set offsets.